

This Page Is Inserted by IFW Operations
and is not a part of the Official Record

BEST AVAILABLE IMAGES

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images may include (but are not limited to):

- BLACK BORDERS
- TEXT CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES
- FADED TEXT
- ILLEGIBLE TEXT
- SKEWED/SLANTED IMAGES
- COLORED PHOTOS
- BLACK OR VERY BLACK AND WHITE DARK PHOTOS
- GRAY SCALE DOCUMENTS

IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.

As rescanning documents *will not* correct images,
please do not report the images to the
Image Problem Mailbox.

THIS PAGE BLANK (USPTO)

BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND

REC'D 11 MAY 2000

WIPO

PCT

EP00/1631



E.J.U.

PRIORITY
DOCUMENTSUBMITTED OR TRANSMITTED IN
COMPLIANCE WITH RULE 17.1(a) OR (b)

Bescheinigung

Die BASF Aktiengesellschaft in Ludwigshafen/Deutschland hat eine Patentanmeldung unter der Bezeichnung

"Verfahren der katalytischen Gasphasenoxidation von Propen zu
Acrylsäure"

am 7. Oktober 1999 beim Deutschen Patent- und Markenamt eingereicht.

Das angeheftete Stück ist eine richtige und genaue Wiedergabe der ursprünglichen Unterlage dieser Patentanmeldung.

Die Anmeldung hat im Deutschen Patent- und Markenamt vorläufig die Symbole C 07 C und B 01 J der Internationalen Patentklassifikation erhalten.

München, den 22. November 1999

Deutsches Patent- und Markenamt

Der Präsident

Im Auftrag

Aktenzeichen: 199 48 248.9

Wehner

Patentansprüche

1. Verfahren der katalytischen Gasphasenoxidation von Propen zu
5 Acrylsäure, bei dem man ein Propen, molekularen Sauerstoff
und wenigstens ein Inertgas, das zu wenigstens 20 % seines
Volumens aus molekularem Stickstoff besteht, enthaltendes Re-
aktionsgasausgangsgemisch 1, das den molekularen Sauerstoff
10 und das Propen in einem molaren Verhältnis $O_2:C_3H_6 \geq 1$ ent-
hält, zunächst in einer ersten Reaktionsstufe bei erhöhter
Temperatur so über einen ersten Festbettkatalysator, dessen
Aktivmasse wenigstens ein Molybdän und/oder Wolfram sowie
Wismut, Tellur, Antimon, Zinn und/oder Kupfer enthaltendes
15 Multimetalloxid ist, führt, daß der Propenumsatz bei einmalig-
em Durchgang ≥ 90 mol-% und die damit einhergehende Selekti-
vität der Acroleinbildung sowie der Acrylsäurenebenprodukt-
bildung zusammengekommen ≥ 90 mol-% betragen, die Temperatur
des die erste Reaktionsstufe verlassenden Produktgasgemisches
20 durch indirekte und/oder direkte Kühlung gegebenenfalls ver-
ringert und dem Produktgasgemisch gegebenenfalls molekularen
Sauerstoff und/oder Inertgas zugibt, und danach das Produkt-
gasgemisch als Acrolein, molekularen Sauerstoff und wenig-
stens ein Inertgas, das zu wenigstens 20 % seines Volumens
25 aus molekularem Stickstoff besteht, enthaltendes Reaktionsga-
sausgangsgemisch 2, das den molekularen Sauerstoff und das
Acrolein in einem molaren Verhältnis $O_2:C_3H_4O \geq 1$ enthält, in
einer zweiten Reaktionsstufe bei erhöhter Temperatur so über
einen zweiten Festbettkatalysator, dessen Aktivmasse wenig-
stens ein Molybdän und Vanadin enthaltendes Multimetalloxid
30 ist, führt, daß der Acroleinumsatz bei einmaligem Durchgang
 ≥ 90 mol-% und die Selektivität der über beide Reaktionsstu-
fen bilanzierten Acrylsäurebildung, bezogen auf umgesetztes
Propen, ≥ 80 mol-% beträgt, dadurch gekennzeichnet, daß
- 35 a) die Belastung des ersten Festbettkatalysators mit dem im
Reaktionsgasausgangsgemisch 1 enthaltenen Propen ≥ 160 Nl
Propen/l Katalysatorschüttung $\cdot h$ beträgt,

40

2

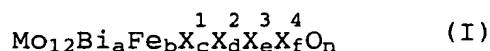
- 5 b) der erste Festbettkatalysator aus einer in zwei räumlich aufeinanderfolgenden Reaktionszonen A,B angeordneten Katalysatorschüttung besteht, wobei die Temperatur der Reaktionszone A 300 bis 350°C und die Temperatur der Reaktionszone B 305 bis 380°C beträgt und gleichzeitig wenigstens 5°C oberhalb der Temperatur der Reaktionszone A liegt,
- 10 c) das Reaktionsgasausgangsgemisch 1 die Reaktionszonen A,B in der zeitlichen Abfolge "erst A", "dann B" durchströmt,
- d) die Reaktionszone A sich bis zu einem Umsatz des Propens von 40 bis 80 mol-% erstreckt,
- 15 e) die Belastung des zweiten Festbettkatalysators mit dem im Reaktionsgasausgangsgemisch 2 enthaltenen Acrolein ≥ 140 Nl Acrolein/l Katalysatorschüttung $\cdot h$ beträgt,
- 20 f) der zweite Festbettkatalysator aus einer in zwei räumlich aufeinanderfolgenden Reaktionszonen C, D angeordneten Katalysatorschüttung besteht, wobei die Temperatur der Reaktionszone C 230 bis 270°C und die Temperatur der Reaktionszone D 250 bis 300°C beträgt und gleichzeitig wenigstens 10°C oberhalb der Reaktionszone C liegt,
- 25 g) das Reaktionsgasausgangsgemisch 2 die Reaktionszonen C, D in der zeitlichen Abfolge "erst C", "dann D" durchströmt und
- 30 h) sich die Reaktionszone C bis zu einem Umsatz des Acroleins von 55 bis 85 mol-% erstreckt.
- 35 2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß sich die Reaktionszone A bis zu einem Umsatz des Propens von 50 bis 70 mol-% erstreckt.
- 40 3. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß sich die Reaktionszone A bis zu einem Umsatz des Propens von 65 bis 75 mol-% erstreckt.
4. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, daß sich die Reaktionszone C bis zu einem Umsatz des Acroleins von 65 bis 80 mol-% erstreckt.
- 45

5. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, daß die Temperatur der Reaktionszone B wenigstens 10°C oberhalb der Temperatur der Reaktionszone A liegt.
- 5 6. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 5, dadurch gekennzeichnet, daß die Temperatur der Reaktionszone D wenigstens 20°C oberhalb der Reaktionszone C liegt
7. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 6, dadurch gekennzeichnet, daß die Temperatur der Reaktionszone B 305 bis
10 340°C beträgt.
8. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 6, dadurch gekennzeichnet, daß die Temperatur der Reaktionszone B 310 bis
15 330°C beträgt.
9. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 8, dadurch gekennzeichnet, daß die Temperatur der Reaktionszone C 245 bis
20 260°C beträgt.
10. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 8, dadurch gekennzeichnet, daß die Temperatur der Reaktionszone D 265 bis
285°C beträgt.
- 25 11. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 10, dadurch gekennzeichnet, daß der Propenumsatz in der ersten Reaktionsstufe bei einmaligem Durchgang ≥ 94 mol-% beträgt.
12. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 11, dadurch gekennzeichnet, daß die Selektivität der Acroleinbildung sowie der
30 Acrylsäurenebenproduktbildung in der ersten Reaktionsstufe bei einmaligem Durchgang zusammengekommen ≥ 94 mol-% beträgt.
13. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 12, dadurch gekennzeichnet, daß der Acroleinumsatz in der zweiten Reaktions-
35 stufe bei einmaligem Durchgang ≥ 94 mol-% beträgt.
14. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 13, dadurch gekennzeichnet, daß die Selektivität der über beide Reaktionsstufen
40 bilanzierten Acrylsäurebildung, bezogen auf umgesetztes Propen, ≥ 85 mol-% beträgt.
15. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 14, dadurch gekennzeichnet, daß die Propenbelastung des ersten Festbettkatalysators ≥ 165 Nl/l · l beträgt.
45

4

16. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 15, dadurch gekennzeichnet, daß die Propenbelastung des ersten Festbettkatalysators $\geq 170 \text{ Nl/l} \cdot \text{l}$ beträgt.
- 5 17. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 16, dadurch gekennzeichnet, daß das wenigstens eine im Reaktionsgasausgangsgemisch 1 enthaltene Inertgas zu $\geq 40 \text{ Vol.-%}$ aus molekularem Stickstoff besteht.
- 10 18. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 16, dadurch gekennzeichnet, daß das wenigstens eine im Reaktionsgasausgangsgemisch 1 enthaltene Inertgas zu $\geq 60 \text{ Vol.-%}$ aus molekularem Stickstoff besteht.
- 15 19. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 18, dadurch gekennzeichnet, daß das wenigstens eine im Reaktionsgasausgangsgemisch 1 enthaltene Inertgas Wasserdampf umfaßt.
- 20 20. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 19, dadurch gekennzeichnet, daß das wenigstens eine im Reaktionsgasausgangsgemisch 1 enthaltene Inertgas CO_2 und/oder CO umfaßt.
- 25 21. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 20, dadurch gekennzeichnet, daß der Propengehalt des Reaktionsgasausgangsgemisches 1 4 bis 15 Vol.-% beträgt.
22. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 21, dadurch gekennzeichnet, daß die Aktivmasse des ersten Festbettkatalysators wenigstens ein Multimetalloxid der allgemeinen Formel I

30



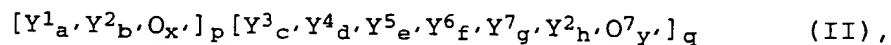
ist, in der die Variablen nachfolgende Bedeutung aufweisen:

35

- $\text{X}^1 =$ Nickel und/oder Kobalt,
 $\text{X}^2 =$ Thallium, ein Alkalimetall und/oder ein Erdalkalimetall,
 $\text{X}^3 =$ Zink, Phosphor, Arsen, Bor, Antimon, Zinn, Cer, Blei und/oder Wolfram,
40 $\text{X}^4 =$ Silicium, Aluminium, Titan und/oder Zirkonium,
 $a =$ 0,5 bis 5,
 $b =$ 0,01 bis 5,
 $c =$ 0 bis 10,
45 $d =$ 0 bis 2,
 $e =$ 0 bis 8,
 $f =$ 0 bis 10 und

n = eine Zahl, die durch die Wertigkeit und Häufigkeit der von Sauerstoff verschiedenen Elemente in I bestimmt wird.

- 5 23. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 21, dadurch gekennzeichnet, daß die Aktivmasse des ersten Festbettkatalysators wenigstens ein Multimetalloxid der allgemeinen Formel II



10

ist, in der die Variablen folgende Bedeutung haben:

Y¹ = Wismut, Tellur, Antimon, Zinn und/oder Kupfer,

Y² = Molybdän und/oder Wolfram,

15 Y³ = ein Alkalimetall, Thallium und/oder Samarium,

Y⁴ = ein Erdalkalimetall, Nickel, Kobalt, Kupfer, Mangan, Zink, Zinn, Cadmium und/oder Quecksilber,

Y⁵ = Eisen, Chrom, Cer und/oder Vanadium,

Y⁶ = Phosphor, Arsen, Bor und/oder Antimon,

20 Y⁷ = ein seltenes Erdmetall, Titan, Zirkonium, Niob, Tantal, Rhenium, Ruthenium, Rhodium, Silber, Gold, Aluminium, Gallium, Indium, Silicium, Germanium, Blei, Thorium und/oder Uran,

25 a' = 0,01 bis 8,

b' = 0,1 bis 30,

c' = 0 bis 4,

d' = 0 bis 20,

e' = 0 bis 20,

30 f' = 0 bis 6,

g' = 0 bis 15,

h' = 8 bis 16,

x', y' = Zahlen, die durch die Wertigkeit und Häufigkeit der von Sauerstoff verschiedenen Elemente in II bestimmt werden und

35

p, q = Zahlen, deren Verhältnis p/q 0,1 bis 10 beträgt,

enthaltend dreidimensional ausgedehnte, von ihrer lokalen Umgebung aufgrund ihrer von ihrer lokalen Umgebung verschiedenen Zusammensetzung abgegrenzte, Bereiche der chemischen Zusammensetzung Y¹_a·Y²_b·O_x, deren Größtdurchmesser 1 nm bis 100 µm betragen.

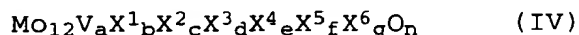
40

24. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 23, dadurch gekennzeichnet, daß der erste Festbettkatalysator ring- und/oder kugelförmige Katalysatoren umfaßt.

45

6

25. Verfahren nach Anspruch 24, dadurch gekennzeichnet, daß die Ringgeometrie die folgende ist:
- 5 Außendurchmesser: 2 bis 10 mm,
 Länge: 2 bis 10 mm,
 Wandstärke: 1 bis 3 mm.
26. Verfahren nach Anspruch 24, dadurch gekennzeichnet, daß der kugelförmige Katalysator ein Schalenkatalysator bestehend aus
- 10 einem kugelförmigen Träger (1 bis 8 mm Durchmesser) und einer auf diesem aufgetragenen Aktivmassenschale (10 bis 1000 µm Dicke) ist.
27. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 26, dadurch gekennzeichnet, daß die erste und die zweite Reaktionsstufe jeweils
- 15 in einem Zweizonenrohrbündelreaktor durchgeführt werden.
28. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 27, dadurch gekennzeichnet, daß die Aktivmasse des zweiten Festbettkatalysators
- 20 wenigstens ein Multimetalloxid der allgemeinen Formel IV



25

mit

- 30 $\text{X}^1 =$ W, Nb, Ta, Cr und/oder Ce,
 $\text{X}^2 =$ Cu, Ni, Co, Fe, Mn und/oder Zn,
 $\text{X}^3 =$ Sb und/oder Bi,
 $\text{X}^4 =$ eines oder mehrere Alkalimetalle,
 $\text{X}^5 =$ eines oder mehrere Erdalkalimetalle,
 $\text{X}^6 =$ Si, Al, Ti und/oder Zr,
 a = 1 bis 6,
35 b = 0,2 bis 4,
 c = 0,5 bis 18,
 d = 0 bis 40,
 e = 0 bis 2,
 f = 0 bis 4,
40 g = 0 bis 40 und
 n = eine Zahl, die durch die Wertigkeit und Häufigkeit der von Sauerstoff verschiedenen Elemente in IV bestimmt wird, ist.

45

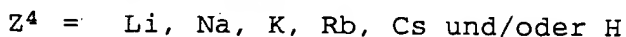
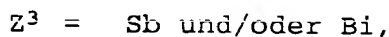
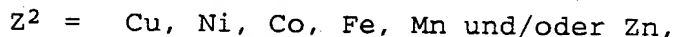
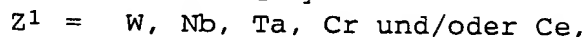
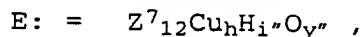
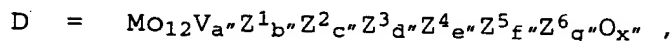
29. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 27, dadurch gekennzeichnet, daß die Aktivmasse des zweiten Festbettkatalysators wenigstens ein Multimetalloxid der allgemeinen Formel VI

5

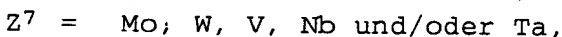
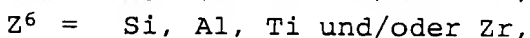
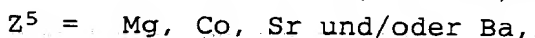


in der die Variablen folgende Bedeutung haben:

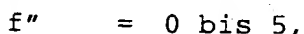
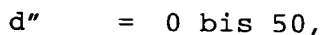
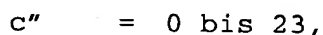
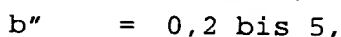
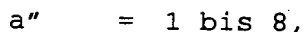
10



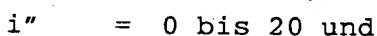
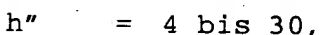
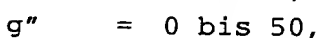
15



20



25



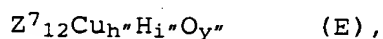
$x'', y'' =$ Zahlen, die durch die Wertigkeit und Häufigkeit der von Sauerstoff verschiedenen Element in VI bestimmt werden und

30

$p, q =$ von Null verschiedene Zahlen, deren Verhältnis p/q 160:1 bis 1:1 beträgt,

35

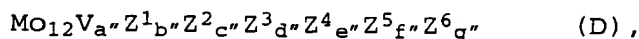
und die dadurch erhältlich sind, daß man eine Multimetall-oxidmasse (E)



40

in feinteiliger Form getrennt vorbildet (Ausgangsmasse 1) und anschließend die vorgebildete feste Ausgangsmasse 1 in eine wäßrige Lösung, eine wäßrige Suspension oder in ein feinteiliges Trockengemisch von Quellen der Elemente Mo, V, Z^1 , Z^2 , Z^3 , Z^4 , Z^5 , Z^6 , die die vorgenannten Elemente in der Stöchiometrie D

45



8

enthält (Ausgangsmasse 2), im gewünschten Mengenverhältnis p:q einarbeitet, die dabei gegebenenfalls resultierende wäßrige Mischung trocknet, und die so erhaltene trockene Vorläufermasse vor oder nach ihrer Trocknung zur gewünschten Katalysatorgeometrie bei Temperaturen von 250 bis 600°C calciniert.

30. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 29, dadurch gekennzeichnet, daß der zweite Festbettkatalysator ringförmige Katalysatoren umfaßt.

31. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 29, dadurch gekennzeichnet, daß der zweite Festbettkatalysator kugelförmige Katalysatoren umfaßt.

15

20

25

30

35

40

45

Verfahren der katalytischen Gasphasenoxidation von Propen zu Acrylsäure

5 Beschreibung

- Vorliegende Erfindung betrifft ein Verfahren der katalytischen Gasphasenoxidation von Propen zu Acrylsäure, bei dem man ein Propen, molekularen Sauerstoff und wenigstens ein Inertgas, das zu
- 10 wenigstens 20 % seines Volumens aus molekularem Stickstoff besteht, enthaltendes Reaktionsgasausgangsgemisch 1, das den molekularen Sauerstoff und das Propen in einem molaren Verhältnis $O_2:C_3H_6 \geq 1$ enthält, zunächst in einer ersten Reaktionsstufe bei erhöhter Temperatur so über einen ersten Festbettkatalysator,
- 15 dessen Aktivmasse wenigstens ein Molybdän und/oder Wolfram sowie Wismut, Tellur, Antimon, Zinn und/oder Kupfer enthaltendes Multimetalloxid ist, führt, daß der Propenumsatz bei einmaligem Durchgang ≥ 90 mol-% und die damit einhergehende Selektivität der Acroleinbildung sowie der Acrylsäurenebenproduktbildung zusammen-
- 20 genommen ≥ 90 mol-% betragen, die Temperatur des die erste Reaktionsstufe verlassenden Produktgasgemisches durch direkte und/oder indirekte Kühlung gegebenenfalls verringert und dem Produktgasgemisch gegebenenfalls molekularen Sauerstoff und/oder Inertgas zugibt, und danach das Produktgasgemisch als Acrolein, mole-
- 25 kularen Sauerstoff und wenigstens ein Inertgas, das zu wenigstens 20 % seines Volumens aus molekularem Stickstoff besteht, enthaltendes Reaktionsgasausgangsgemisch 2, das den molekularen Sauerstoff und das Acrolein in einem molaren Verhältnis $O_2:C_3H_4O \geq 1$ enthält, in einer zweiten Reaktionsstufe bei erhöhter Temperatur
- 30 so über einen zweiten Festbettkatalysator, dessen Aktivmasse wenigstens ein Molybdän und Vanadin enthaltendes Multimetalloxid ist, führt, daß der Acroleinumsatz bei einmaligem Durchgang ≥ 90 mol-% und die Selektivität der über beide Reaktionsstufen bilanzierten Acrylsäurebildung, bezogen auf umgesetztes Propen,
- 35 ≥ 80 mol-% beträgt.

- Das vorgenannte Verfahren der katalytischen Gasphasenoxidation von Propen zu Acrylsäure ist allgemein bekannt (vgl. z.B. DE-A 3002829). Im besonderen sind die beiden Reaktionsstufen für
- 40 sich bekannt (vgl. z.B. EP-A 714700, EP-A 700893, EP-A 15565, DE-C 2830765, DE-C 3338380, JP-A 91/294239, EP-A 807465, WO 98/24746, EP-B 279374, DE-C 2513405, DE-A 3300044, EP-A 575897 und DE-A 19855913).

2

Acrylsäure ist ein bedeutendes Monomeres, das als solches oder in Form seiner Alkylester zur Erzeugung von z.B. als Klebstoffen geeigneten Polymerisaten Verwendung findet.

- 5 Die Zielsetzung einer jeden zweistufigen Festbettgasphasenoxidation von Propen zu Acrylsäure besteht grundsätzlich darin, eine möglichst hohe Raum-Zeit-Ausbeute an Acrylsäure (RZA_{AS}) zu erzielen (das ist bei einer kontinuierlichen Verfahrensweise die je Stunde und Gesamtvolumen der verwendeten Katalysatorschüttung in
10 Litern erzeugte Gesamtmenge an Acrylsäure).

- Es besteht deshalb generelles Interesse daran, eine solche zweistufige Festbettgasphasenoxidation von Propen zu Acrylsäure einerseits unter einer möglichst hohen Belastung der ersten Fest-
15 bettkatalysatorschüttung mit Propen (darunter wird die Menge an Propen in Normlitern (= Nl ; das Volumen in Liter, das die entsprechende Propenmenge bei Normalbedingungen, d.h., bei 25°C und 1 bar, einnehmen würde) verstanden, die als Bestandteil des Reaktionsgasausgangsgemisches 1 pro Stunde durch einen Liter an Katalysatorschüttung 1 geführt wird) und andererseits unter einer
20 möglichst hohen Belastung der zweiten Festbettkatalysatorschüttung mit Acrolein (darunter wird die Menge an Acrolein in Normlitern (= Nl ; das Volumen in Liter, das die entsprechende Acroleinmenge bei Normalbedingungen, d.h., bei 25°C und 1 bar, einnehmen
25 würde) verstanden, die als Bestandteil des Reaktionsgasausgangsgemisches 2 pro Stunde durch einen Liter an Katalysatorschüttung 2 geführt wird) durchzuführen, ohne dabei den beim einmaligen Durchgang des Reaktionsgasausgangsgemisches durch die beiden Festbettkatalysatorschüttungen erfolgenden Umsatz an Propen
30 und Acrolein sowie die über beide Reaktionsstufen bilanzierte Selektivität der damit einhergehenden Acrylsäurebildung (bezogen auf umgesetztes Propen) nennenswert zu beeinträchtigen.

- Die Realisierung des Vorgenannten wird durch die Tatsache beeinträchtigt, daß sowohl die Festbettgasphasenoxidation von Propen
35 zu Acrolein als auch die Festbettgasphasenoxidation von Acrolein zu Acrylsäure einerseits stark exotherm verläuft und andererseits von einer Vielfalt möglicher Parallel- und Folgereaktionen begleitet wird.

- 40 Mit zunehmender Propen- bzw. Acroleinbelastung der jeweiligen Festbettkatalysatorschüttung muß, bei Verwirklichung der angestrebten Randbedingung eines im wesentlichen gleichbleibenden Propen- bzw. Acroleinumsatzes, daher davon ausgegangen werden, daß
45 infolge der erhöhten Wärmeproduktion die Selektivität der Wert-

3
produktbildung abnimmt (vgl. z.B. EP-B 450 396, Example 1 und Example 2).

Die konventionellen Verfahren der katalytischen Festbettgasphase-
5 noxidation von Propen zu Acrolein bzw. von Acrolein zu Acrylsäure, die dadurch charakterisiert sind, daß als ein Hauptbestandteil des inerten Verdünnungsgases Stickstoff und außerdem ein in einer Reaktionszone befindlicher und längs dieser Reaktion homogener, d.h., über die Festbettkatalysatorschüttung chemisch
10 einheitlich zusammengesetzter, Festbettkatalysator verwendet und die Temperatur der Reaktionszone auf einem über die Reaktionszone einheitlichen Wert gehalten wird (unter Temperatur einer Reaktionszone wird hier die Temperatur der in der Reaktionszone befindlichen Festbettkatalysatorschüttung bei Ausübung des Verfahrens
15 in Abwesenheit einer chemischen Reaktion verstanden; ist diese Temperatur innerhalb der Reaktionszone nicht konstant, so meint der Begriff Temperatur einer Reaktionszone hier den Zahlenmittelwert der Temperatur der Katalysatorschüttung längs der Reaktionszone), beschränken daher den anzuwendenden Wert der Propen- bzw.
20 Acroleinbelastung der Festbettkatalysatorschüttung.

So liegt der angewandte Wert der Propenbelastung der Festbettkatalysatorschüttung normalerweise bei Werten ≤ 155 Nl Propen/l Katalysatorschüttung \cdot h (vgl. z.B. EP-A 15565 (maximale Propen-
25 last = 120 Nl Propen/l.h), DE-C 2830765 (maximale Propenlast = 94,5 Nl Propen/l.h), EP-A 804465 (maximale Propenlast = 128 Nl Propen/l.h), EP-B 279374 (maximale Propenlast = 112 Nl Propen/l.h), DE-C 2513405 (maximale Propenlast = 110 Nl Propen/l.h), DE-A 3300044 (maximale Propen-
30 last = 112 Nl Propen/l.h), EP-A 575897 (maximale Propenlast = 120 Nl Propen/l.h), DE-C 3338380 (in im wesentlichen allen Beispielen beträgt die maximale Propenlast 126 Nl Propen/l.h; nur im Fall einer speziellen Katalysatorzusammensetzung wurde eine Propenlast von 162 Nl/l.h realisiert) und DE-A 19855913 (maximale
35 Propenlast = 155 Nl Propen/l.h).

Die WO 98/24746 erachtet es bereits bei einer Propenbelastung von bis zu 148,8 Nl Propen/l.h als erforderlich, die Katalysatorschüttung so zu strukturieren, daß ihre volumenspezifische Aktivität
40 in Strömungsrichtung des Reaktionsgasgemisches sukzessive zunimmt.

Die JP-A 91/294239 offenbart zwar in einer beispielhaften Ausführungsform bei im wesentlichen konventioneller Verfahrensweise
45 eine Propenlast der Katalysatorschüttung von 160 Nl Propen/l.h für eine katalytische Gasphasenoxidation von Propen zu Acrolein als möglich, dies jedoch ebenfalls nur zum Preis einer in Strömungs-

4

richtung des Reaktionsgasgemisches sukzessive zunehmenden volumenspezifischen Aktivität. Eine solche Verfahrensweise ist großtechnisch aber nur wenig praktikabel, wird die gasphasenkatalytische Oxidation von Propen zu Acrolein üblicherweise doch in

5 Rohrbündelreaktoren mit einigen tausend Kontaktrohren durchgeführt, von denen jedes einzelne mit der abgestuften Katalysatorschüttung beschickt werden muß.

In der EP-B 450596 wurde unter Anwendung einer strukturierten Katalysatorschüttung bei ansonsten konventioneller Verfahrensweise

10 eine Propenlast der Katalysatorschüttung von 202,5 Nl Propen/l.h realisiert. Dies allerdings auf Kosten einer verringerten Wertproduktselektivität.

15 Die EP-B 253409 und das zugehörige Äquivalent, die EP-B 257565, offenbaren, daß bei Verwendung eines inerten Verdünnungsgases das eine höhere molare Wärmekapazität als molekularer Stickstoff aufweist, der Anteil an Propen im Reaktionsgasausgangsgemisch erhöht werden kann. Nichtsdestotrotz liegt aber auch in den beiden vor-

20 genannten Schriften die maximale realisierte Propenbelastung der Katalysatorschüttung bei 140 Nl Propen/l.h.

In der EP-A 293224 wurden Propenbelastungen oberhalb von 160 Nl Propen/l.h realisiert. Dies allerdings auf Kosten eines speziellen

25 zu verwendenden inerten Verdünnungsgases, das völlig frei von molekularem Stickstoff ist. Nachteilig an diesem Verdünnungsgas ist insbesondere, daß es sich bei all seinen Bestandteilen, im Unterschied zu molekularem Stickstoff, um Wertprodukte handelt, die bei einer kontinuierlichen Durchführung des Verfahrens in aufwendiger Weise aus Gründen der Wirtschaftlichkeit wenigstens teilweise in die Gasphasenoxidation rückgeführt werden müssen.

30

In entsprechender Weise beschränken die Verfahren des Standes der Technik den anzuwendenden Wert der Acroleinbelastung der Fest-

35 bettkatalysatorschüttung bei einer katalytischen Gasphasenoxidation von Acrolein zu Acrylsäure normalerweise auf Werte ≤ 150 Nl Acrolein/l Katalysator · h (vgl. z.B. EP-B 714700; dort beträgt die maximale angewandte Acroleinlast = 120 Nl Acrolein/l.h).

40 Zweistufige Gasphasenoxidationen von Propen zu Acrylsäure, bei denen in den beiden Oxidationsstufen sowohl eine hohe Propenbelastung als auch eine hohe Acroleinbelastung des jeweiligen Festbettkatalysators gefahren werden, sind aus dem Stand der Technik so gut wie nicht bekannt.

Eine der wenigen Ausnahmen bilden die bereits zitierte EP-B 253409 und das zugehörige Äquivalent, die EP-B 257565. Nichtsdestotrotz liegt aber auch in diesen beiden Schriften die maximale realisierte Propenbelastung, trotz Verwendung eines in-
5 erten Verdünnungsgases mit einer höheren molaren Wärmekapazität als Stickstoff, und damit im wesentlichen automatisch auch die bei direktem Durchgang des Produktgasgemisches der Propenoxida-
10 10 nsstufe in die Acroleinoxidationsstufe nachfolgende Acroleinbe-
lastung der Katalysatorschüttung bei ≤ 140 Nl Reaktand (Propen oder Acrolein)/l.h.

Die Aufgabe der vorliegenden Erfindung bestand daher darin, ein wie eingangs definiertes Verfahren der katalytischen Gasphaseno-
xidation von Propen zu Acrylsäure zur Verfügung zu stellen, das
15 15 eine erhöhte Raum-Zeit-Ausbeute an Acrylsäure gewährleistet, ohne die Nachteile der Hochlastfahrweisen des Standes der Technik auf-
zuweisen.

Demgemäß wurde ein Verfahren der katalytischen Gasphasenoxidation
20 20 von Propen zu Acrylsäure, bei dem man ein Propen, molekularen Sauerstoff und wenigstens ein Inertgas, das zu wenigstens 20 % seines Volumens aus molekularem Stickstoff besteht, enthaltendes
Reaktionsgasausgangsgemisch 1, das den molekularen Sauerstoff und
das Propen in einem molaren Verhältnis $O_2:C_3H_6 \geq 1$ enthält, zu-
25 25 nächst in einer ersten Reaktionsstufe bei erhöhter Temperatur so über einen ersten Festbettkatalysator, dessen Aktivmasse wenig-
stens ein Molybdän und/oder Wolfram sowie Wismut, Tellur, Anti-
mon, Zinn und/oder Kupfer enthaltendes Multimetalloxid ist,
führt, daß der Propenumsatz bei einmaligem Durchgang ≥ 90 mol-%
30 30 und die damit einhergehende Selektivität der Acroleinbildung so-
wie der Acrylsäurenebenproduktbildung zusammengekommen ≥ 90 mol-%
betragen, die Temperatur des die erste Reaktionsstufe verlassen-
den Produktgasgemisches durch indirekte und/oder direkte Kühlung
gegebenenfalls verringert und dem Produktgasgemisch gegebenen-
35 35 falls molekularen Sauerstoff und/oder Inertgas zugibt, und danach
das Produktgasgemisch als Acrolein, molekularen Sauerstoff und
wenigstens ein Inertgas, das zu wenigstens 20 % seines Volumens
aus molekularem Stickstoff besteht, enthaltendes Reaktionsgasaus-
gangsgemisch 2, das den molekularen Sauerstoff und das Acrolein
40 40 in einem molaren Verhältnis $O_2:C_3H_4O \geq 1$ enthält, in einer zweiten
Reaktionsstufe bei erhöhter Temperatur so über einen zweiten
Festbettkatalysator, dessen Aktivmasse wenigstens ein Molybdän
und Vanadin enthaltendes Multimetalloxid ist, führt, daß der
Acroleinumsatz bei einmaligem Durchgang ≥ 90 mol-% und die Sele-
45 45 tivität der über beide Reaktionsstufen bilanzierten Acrylsäure-

6

bildung, bezogen auf umgesetztes Propen, ≥ 80 mol-% beträgt, gefunden, das dadurch gekennzeichnet ist, daß

- 5 a) die Belastung des ersten Festbettkatalysators mit dem im Reaktionsgasausgangsgemisch 1 enthaltenen Propen ≥ 160 Nl Propen/l Katalysatorschüttung $\cdot h$ beträgt,
- 10 b) der erste Festbettkatalysator aus einer in zwei räumlich aufeinanderfolgenden Reaktionszonen A,B angeordneten Katalysatorschüttung besteht, wobei die Temperatur der Reaktionszone A 300 bis 350°C und die Temperatur der Reaktionszone B 305 bis 380°C beträgt und gleichzeitig wenigstens 5°C oberhalb der Temperatur der Reaktionszone A liegt,
- 15 c) das Reaktionsgasausgangsgemisch 1 die Reaktionszonen A,B in der zeitlichen Abfolge "erst A", "dann B" durchströmt,
- d) die Reaktionszone A sich bis zu einem Umsatz des Propens von 40 bis 80 mol-% erstreckt,
- 20 e) die Belastung des zweiten Festbettkatalysators mit dem im Reaktionsgasausgangsgemisch 2 enthaltenen Acrolein ≥ 140 Nl Acrolein/l Katalysatorschüttung $\cdot h$ beträgt,
- 25 f) der zweite Festbettkatalysator aus einer in zwei räumlich aufeinanderfolgenden Reaktionszonen C,D angeordneten Katalysatorschüttung besteht, wobei die Temperatur der Reaktionszone C 230 bis 270°C und die Temperatur der Reaktionszone D 250 bis 300°C beträgt und gleichzeitig wenigstens 10°C oberhalb der Temperatur der Reaktionszone A liegt,
- 30 g) das Reaktionsgasausgangsgemisch 2 die Reaktionszonen C,D in der zeitlichen Abfolge "erst C", "dann D" durchströmt und
- 35 h) sich die Reaktionszone C bis zu einem Umsatz des Acroleins von 55 bis 85 mol-% erstreckt.

Bevorzugt erstreckt sich die Reaktionszone A bis zu einem Propenumsatz von 50 bis 70 mol-% und besonders bevorzugt bis zu einem
40 Propenumsatz von 65 bis 75 mol-%.

Die Temperatur der Reaktionszone B beträgt erfindungsgemäß in vorteilhafter Weise 305 bis 365°C, bzw. 340°C und besonders vorteilhaft 310 bis 330°C. Ferner liegt die Temperatur der Reaktions-
45 zone B bevorzugt wenigstens 10°C oberhalb der Temperatur der Reaktionszone A.

Je höher die Propenbelastung der Katalysatorschüttung 1 beim erfindungsgemäßen Verfahren gewählt wird, um so größer sollte die Differenz zwischen der Temperatur der Reaktionszone A und der Temperatur der Reaktionszone B gewählt werden. Normalerweise wird
5 die vorgenannte Temperaturdifferenz beim erfindungsgemäßen Verfahren aber nicht mehr als 50°C betragen. D.h., die Differenz zwischen der Temperatur der Reaktionszone A und der Temperatur der Reaktionszone B kann erfindungsgemäß bis zu 20°C, bis zu 25°C, bis zu 30°C, bis zu 40°C, bis zu 45°C oder bis zu 50°C betragen.

10

In der Regel wird der auf den einfachen Durchgang bezogene Propenumsatz beim erfindungsgemäßen Verfahren in der ersten Reaktionsstufe ≥ 92 mol-% oder ≥ 94 mol-% betragen. Die in der ersten Reaktionsstufe bei einfachem Durchgang resultierende Selektivität
15 der Acroleinbildung sowie der Acrylsäurenebenproduktbildung wird dabei regelmäßig ≥ 92 mol-% oder ≥ 94 mol-%, häufig ≥ 95 mol-% oder ≥ 96 mol-% bzw. ≥ 97 mol-% betragen.

In überraschender Weise gilt das Vorgenannte nicht nur bei Propenbelastungen der Katalysatorschüttung 1 von ≥ 165 Nl/l·h oder
20 von ≥ 170 Nl/l·h bzw. ≥ 175 Nl/l·h oder ≥ 180 Nl/l·h, sondern auch bei Propenbelastungen der Katalysatorschüttung 1 von ≥ 185 Nl/l·h oder ≥ 190 Nl/l·h bzw. ≥ 200 Nl/l·h oder ≥ 210 Nl/l·h sowie bei Belastungswerten ≥ 220 Nl/l·h oder ≥ 230 Nl/l·h bzw. ≥ 240 Nl/l·h
25 oder ≥ 250 Nl/l·h.

Dabei überrascht, daß vorgenannte Werte selbst dann erreichbar sind, wenn das für das Reaktionsgasausgangsgemisch 1 erfindungsgemäß verwendete Inertgas zu ≥ 30 Vol-%, oder zu ≥ 40 Vol-%, oder
30 zu ≥ 50 Vol-%, oder zu ≥ 60 Vol-%, oder zu ≥ 70 Vol-%, oder zu ≥ 80 Vol-%, oder zu ≥ 90 Vol-%, oder zu ≥ 95 Vol-% aus molekularem Stickstoff besteht.

Bei Propenbelastungen der Katalysatorschüttung 1 oberhalb von
35 250 Nl/l·h wird für das erfindungsgemäße Verfahren die Mitverwendung von inerten (inerte Verdünnungsgase sollen hier generell solche sein, die sich beim einmaligen Durchgang durch die jeweilige Reaktionsstufe zu weniger als 5 %, bevorzugt zu weniger als 2 % umsetzen) Verdünnungsgasen wie Propan, Ethan, Methan, Pentan,
40 Butan, CO₂, CO, Wasserdampf und/oder Edelgasen für das Reaktionsgasausgangsgemisch 1 empfohlen. Selbstverständlich können diese Gase und ihre Gemische aber auch bereits bei geringeren Propenbelastungen der Katalysatorschüttung 1 im Reaktionsgasausgangsgemisch 1 mitverwendet oder als alleinige Verdünnungsgase verwendet
45 werden. Es überrascht, daß das erfindungsgemäße Verfahren mit einer über die Reaktionszonen A, B betrachtet homogenen, d.h., chemisch einheitlichen, Katalysatorschüttung 1 durchgeführt werden

8

kann, ohne in nennenswertem Umfang Umsatz- und/oder Selektivitätseinbußen zu erleiden.

Normalerweise wird beim erfindungsgemäßen Verfahren die Propenbelastung der ersten Festbettkatalysators den Wert 600 Nl/l·h nicht überschreiten. In typischer Weise liegen die Propenbelastungen des ersten Festbettkatalysators beim erfindungsgemäßen Verfahren ohne nennenswerten Verlust von Umsatz und Selektivität bei Werten ≤ 300 Nl/l·h, häufig bei Werten ≤ 250 Nl/l·h.

10

Der Arbeitsdruck kann beim erfindungsgemäßen Verfahren in der ersten Reaktionsstufe sowohl unterhalb von Normaldruck (z.B. bis zu 0,5 bar) als auch oberhalb von Normaldruck liegen. Typischerweise wird der Arbeitsdruck in der ersten Reaktionsstufe bei Werten von 1 bis 5 bar, häufig 1,5 bis 3,5 bar liegen. Normalerweise wird der Reaktionsdruck in der ersten Reaktionsstufe 100 bar nicht überschreiten.

Das molare Verhältnis von $O_2:C_3H_6$ im Reaktionsgasausgangsgemisch 1 muß erfindungsgemäß ≥ 1 betragen. Üblicherweise wird dieses Verhältnis bei Werten ≤ 3 liegen. Häufig beträgt das molare Verhältnis von $O_2:C_3H_6$ im Reaktionsgasausgangsgemisch 1 erfindungsgemäß $\geq 1,5$ und $\leq 2,0$.

Als Quelle für den in der ersten Reaktionsstufe erforderlichen molekulären Sauerstoff kommt sowohl Luft, als auch an molekularem Stickstoff entreicherte Luft (z.B. ≥ 90 Vol.-% O_2 , ≤ 10 Vol.-% N_2) in Betracht.

Der Propenanteil im Reaktionsgasausgangsgemisch 1 kann erfindungsgemäß z.B. bei Werten von 4 bis 15 Vol.-%, häufig bei 5 bis 12 Vol.-% bzw. 5 bis 8 Vol.-% liegen (jeweils bezogen auf das Gesamtvolumen).

Häufig wird man das erfindungsgemäße Verfahren bei einem Pro-pen:Sauerstoff:indifferente Gase (einschließlich Wasserdampf) Volumenverhältnis im Reaktionsgasausgangsgemisch 1 von 1:(1,0 bis 3,0):(5 bis 25), vorzugsweise 1:(1,7 bis 2,3):(10 bis 15) durchführen.

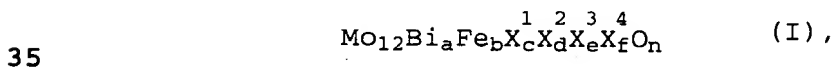
40

In der Regel enthält das Reaktionsgasausgangsgemisch 1 neben den genannten Bestandteilen im wesentlichen keine weiteren Komponenten.

45

Als Festbettkatalysatoren 1 kommen für das erfindungsgemäße Verfahren alle diejenigen in Betracht, deren Aktivmasse wenigstens ein Mo, Bi und Fe enthaltendes Multimetalloxid ist.

- 5 D.h., prinzipiell können alle diejenigen Katalysatoren, die in den Schriften DE-C 3338380, DE-A 19902562, EP-A 15565, DE-C 2380765, EP-A 807465, EP-A 279374, DE-A 3300044, EP-A 575897, US-A 4438217, DE-A 19855913, WO 98/24746, DE-A 19746210 (diejenigen der allgemeinen Formel II), JP-A 91/294239, EP-A 293224 und EP-A 700714 offenbart werden, als Festbettkatalysatoren 1 eingesetzt werden. Dies gilt insbesondere für die beispielhaften Ausführungsformen in diesen Schriften, unter denen jene der EP-A 15565, der EP-A 575897, der DE-A 19746210 und der DE-A 19855913 besonders bevorzugt werden. Besonders hervorzuheben sind in diesem Zusammenhang ein Katalysator gemäß Beispiel 1c aus der EP-A 15565 sowie ein in entsprechender Weise herzustellender Katalysator, dessen Aktivmasse jedoch die Zusammensetzung $\text{Mo}_{12}\text{Ni}_{6,5}\text{Zn}_2\text{Fe}_2\text{Bi}_1\text{Po}_{,0065}\text{K}_{0,06}\text{O}_x \cdot 10\text{SiO}_2$ aufweist. Ferner sind hervorzuheben das Beispiel mit der laufenden Nr. 3 aus der DE-A 19855913 (Stöchiometrie: $\text{Mo}_{12}\text{Co}_7\text{Fe}_3\text{Bi}_{0,6}\text{K}_{0,08}\text{Si}_{1,6}\text{O}_x$) als Hohlzylindervollkatalysator der Geometrie 5 mm x 3 mm x 2 mm (Außendurchmesser x Höhe x Innendurchmesser) sowie der Multimetalloxid II - Vollkatalysator gemäß Beispiel 1 der DE-A 19746210. Ferner wären die Multimetalloxid-Katalysatoren der US-A 4438217 zu nennen. Letzteres gilt insbesondere dann, wenn diese Hohlzylinder eine Geometrie 5 mm x 2 mm x 2 mm, oder 5 mm x 3 mm x 2 mm, oder 6 mm x 3 mm x 3 mm, oder 7 mm x 3 mm x 4 mm (jeweils Außendurchmesser x Höhe x Innendurchmesser) aufweisen.
- 30 Eine Vielzahl der als Festbettkatalysatoren 1 geeigneten Multimetalloxidaktivmassen läßt sich unter der allgemeinen Formel I



in der die Variablen nachfolgende Bedeutung aufweisen:

- X^1 = Nickel und/oder Kobalt,
- 40 X^2 = Thallium, ein Alkalimetall und/oder ein Erdalkalimetall,
- X^3 = Zink, Phosphor, Arsen, Bor, Antimon, Zinn, Cer, Blei und/oder Wolfram,
- X^4 = Silicium, Aluminium, Titan und/oder Zirkonium,
- 45 a = 0,5 bis 5,
- b = 0,01 bis 5, vorzugsweise 2 bis 4,
- c = 0 bis 10, vorzugsweise 3 bis 10,

10

- d = 0 bis 2, vorzugsweise 0,02 bis 2,
e = 0 bis 8, vorzugsweise 0 bis 5,
f = 0 bis 10 und
n = eine Zahl, die durch die Wertigkeit und Häufigkeit der von
5 Sauerstoff verschiedenen Elemente in I bestimmt wird, sub-
summieren.

- Sie sind in an sich bekannter Weise erhältlich (siehe z.B. die
DE-A 4023239) und werden üblicherweise in Substanz zu Kugeln,
10 Ringen oder Zylindern geformt oder auch in Gestalt von Schalenka-
talyseur, d.h., mit der Aktivmasse beschichteten vorgeformten,
inerten Trägerkörpern, eingesetzt. Selbstverständlich können sie
aber auch in Pulverform als Katalysatoren 1 angewendet werden.
Selbstverständlich kann als Katalysator 1 erfindungsgemäß auch
15 der Bi, Mo und Fe umfassende Multimetall-oxidkatalysator ACS-4 der
Fa. Nippon Shokubai verwendet werden.

- Prinzipiell können für die Festbettkatalysatoren 1 geeignete Ak-
tivmassen, insbesondere solche der allgemeinen Formel I, in ein-
20 facher Weise dadurch hergestellt werden, daß man von geeigneten
Quellen ihrer elementaren Konstituenten ein möglichst inniges,
vorzugsweise feinteiliges, ihrer Stöchiometrie entsprechend zu-
sammengesetztes, Trockengemisch erzeugt und dieses bei Temperatu-
ren von 350 bis 650°C calciniert. Die Calcination kann sowohl un-
25 ter Inertgas als auch unter einer oxidativen Atmosphäre wie z.B.
Luft (Gemisch aus Inertgas und Sauerstoff) sowie auch unter redu-
zierender Atmosphäre (z.B. Gemisch aus Inertgas, NH_3 , CO und/oder
 H_2) erfolgen. Die Calcinationsdauer kann einige Minuten bis einige
Stunden betragen und nimmt üblicherweise mit der Temperatur ab.
30 Als Quellen für die elementaren Konstituenten der Multimetall-
oxidaktivmassen I kommen solche Verbindungen in Betracht, bei de-
nen es sich bereits um Oxide handelt und/oder um solche Verbin-
dungen, die durch Erhitzen, wenigstens in Anwesenheit von Sauer-
stoff, in Oxide überführbar sind.

35

- Neben den Oxiden kommen als solche Ausgangsverbindungen vor allem
Halogenide, Nitrate, Formiate, Oxalate, Citrate, Acetate, Carbo-
nate, Aminkomplexe, Ammonium-Salze und/oder Hydroxide in Betracht
(Verbindungen wie NH_4OH , $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$, NH_4NO_3 , NH_4CHO_2 , CH_3COOH ,
40 $\text{NH}_4\text{CH}_3\text{CO}_2$ und/oder Ammoniumoxalat, die spätestens beim späteren
Calcinieren zu vollständig gasförmig entweichenden Verbindungen
zerfallen und/oder zersetzt werden können, können in das innige
Trockengemisch zusätzlich eingearbeitet werden).

- 45 Das innige Vermischen der Ausgangsverbindungen zur Herstellung
von Multimetall-oxidmassen I kann in trockener oder in nasser Form
erfolgen. Erfolgt er in trockener Form, so werden die Ausgangs-

- verbindungen zweckmäßigerweise als feinteilige Pulver eingesetzt und nach dem Mischen und gegebenenfalls Verdichten der Calcini-
 rung unterworfen. Vorzugsweise erfolgt das innige Vermischen je-
 doch in nasser Form. Üblicherweise werden dabei die Ausgangsver-
 5 bindungen in Form einer wäßrigen Lösung und/oder Suspension mit-
 einander vermischt. Besonders innige Trockengemische werden beim
 beschriebenen Mischverfahren dann erhalten, wenn ausschließlich
 von in gelöster Form vorliegenden Quellen der elementaren Konsti-
 tuenten ausgegangen wird. Als Lösungsmittel wird bevorzugt Wasser
 10 eingesetzt. Anschließend wird die erhaltene wäßrige Masse ge-
 trocknet, wobei der Trocknungsprozeß vorzugsweise durch Sprüh-
 trocknung der wäßrigen Mischung mit Austrittstemperaturen von 100
 bis 150°C erfolgt.
- 15 Die als erfindungsgemäße Festbettkatalysatoren 1 geeigneten Mul-
 timetalloxidmassen, insbesondere jene der allgemeinen Formel I,
 können für das erfindungsgemäße Verfahren sowohl in Pulverform
 als auch zu bestimmten Katalysatorgeometrien geformt eingesetzt
 werden, wobei die Formgebung vor oder nach der abschließenden
 20 Calcination erfolgen kann. Beispielsweise können aus der Pulver-
 form der Aktivmasse oder ihrer uncalcinierten und/oder partiell
 calcinierten Vorläufermasse durch Verdichten zur gewünschten Ka-
 talysatorgeometrie (z.B. durch Tablettieren, Extrudieren oder
 Strangpressen) Vollkatalysatoren hergestellt werden, wobei gege-
 25 benenfalls Hilfsmittel wie z.B. Graphit oder Stearinsäure als
 Gleitmittel und/oder Formhilfsmittel und Verstärkungsmittel wie
 Mikrofasern aus Glas, Asbest, Siliciumcarbid oder Kaliumtitanat
 zugesetzt werden können. Geeignete Vollkatalysatorgeometrien sind
 z.B. Vollzylinder oder Hohlzylinder mit einem Außendurchmesser
 30 und einer Länge von 2 bis 10 mm. Im Fall der Hohlzylinder ist
 eine Wandstärke von 1 bis 3 mm zweckmäßig. Selbstverständlich
 kann der Vollkatalysator auch Kugelgeometrie aufweisen, wobei der
 Kugeldurchmesser 2 bis 10 mm betragen kann.
- 35 Selbstverständlich kann die Formgebung der pulverförmigen Aktiv-
 masse oder ihrer pulverförmigen, noch nicht und/oder partiell
 calcinierten, Vorläufermasse auch durch Aufbringen auf vorge-
 formte inerte Katalysatorträger erfolgen. Die Beschichtung der
 Trägerkörper zur Herstellung der Schalenkatalysatoren wird in der
 40 Regel in einem geeigneten drehbaren Behälter ausgeführt, wie es
 z.B. aus der DE-A 2909671, der EP-A 293859 oder aus der
 EP-A 714700 bekannt ist. Zweckmäßigerweise wird zur Beschichtung
 der Trägerkörper die aufzubringende Pulvermasse befeuchtet und
 nach dem Aufbringen, z.B. mittels heißer Luft, wieder getrocknet.
- 45 Die Schichtdicke der auf den Trägerkörper aufgetragenen Pulver-
 masse wird zweckmäßigerweise im Bereich 10 bis 1000 µm, bevorzugt

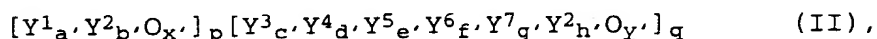
12

im Bereich 50 bis 500 μm und besonders bevorzugt im Bereich 150 bis 250 μm liegend, gewählt.

- Als Trägermaterialien können dabei übliche poröse oder unporöse Aluminiumoxide, Siliciumdioxid, Thoriumdioxid, Zirkondioxid, Siliciumcarbid oder Silikate wie Magnesium- oder Aluminiumsilikat verwendet werden. Die Trägerkörper können regelmäßig oder unregelmäßig geformt sein, wobei regelmäßig geformte Trägerkörper mit deutlich ausgebildeter Oberflächenrauigkeit, z.B. Kugeln oder Hohlzylinder, bevorzugt werden. Geeignet ist die Verwendung von im wesentlichen unporösen, oberflächenrauen, kugelförmigen Trägern aus Steatit, deren Durchmesser 1 bis 8 mm, bevorzugt 4 bis 5 mm beträgt. Geeignet ist aber auch die Verwendung von Zylindern als Trägerkörper, deren Länge 2 bis 10 mm und deren Außendurchmesser 4 bis 10 mm beträgt. Im Fall von erfindungsgemäß geeigneten Ringen als Trägerkörper liegt die Wanddicke darüber hinaus üblicherweise bei 1 bis 4 mm. Erfindungsgemäß bevorzugt zu verwendende ringförmige Trägerkörper besitzen eine Länge von 3 bis 6 mm, einen Außendurchmesser von 4 bis 8 mm und eine Wanddicke von 1 bis 2 mm. Erfindungsgemäß geeignet sind vor allem auch Ringe der Geometrie 7 mm x 3 mm x 4 mm (Außendurchmesser x Länge x Innendurchmesser) als Trägerkörper. Die Feinheit der auf die Oberfläche des Trägerkörpers aufzubringenden katalytisch aktiven Oxidmassen wird selbstredend an die gewünschte Schalendicke angepaßt (vgl. EP-A 714 700).

Günstige als Festbettkatalysatoren 1 erfindungsgemäß zu verwendende Multimetalloxidaktivmassen sind ferner Massen der allgemeinen Formel II

30



in der die Variablen folgende Bedeutung haben:

- 35 Y^1 = Wismut, Tellur, Antimon, Zinn und/oder Kupfer,
 Y^2 = Molybdän und/oder Wolfram,
 Y^3 = ein Alkalimetall, Thallium und/oder Samarium,
 Y^4 = ein Erdalkalimetall, Nickel, Kobalt, Kupfer, Mangan, Zink, Zinn, Cadmium und/oder Quecksilber,
40 Y^5 = Eisen, Chrom, Cer und/oder Vanadium,
 Y^6 = Phosphor, Arsen, Bor und/oder Antimon,
 Y^7 = ein seltenes Erdmetall, Titan, Zirkonium, Niob, Tantal, Rhenium, Ruthenium, Rhodium, Silber, Gold, Aluminium, Gallium, Indium, Silicium, Germanium, Blei, Thorium und/oder
45 Uran,

$$\text{a}' = 0,01 \text{ bis } 8,$$

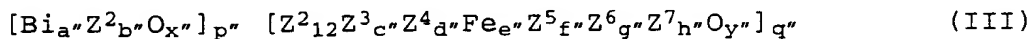
- $b' = 0,1 \text{ bis } 30,$
 $c' = 0 \text{ bis } 4,$
 $d' = 0 \text{ bis } 20,$
 $e' = 0 \text{ bis } 20,$
 5 $f' = 0 \text{ bis } 6,$
 $g' = 0 \text{ bis } 15,$
 $h' = 8 \text{ bis } 16,$

- $x', y' =$ Zahlen, die durch die Wertigkeit und Häufigkeit der von Sauerstoff verschiedenen Elemente in II bestimmt werden und
 10 $p, q =$ Zahlen, deren Verhältnis p/q 0,1 bis 10 beträgt,

- enthaltend dreidimensional ausgedehnte, von ihrer lokalen Umgebung aufgrund ihrer von ihrer lokalen Umgebung verschiedenen Zusammensetzung abgegrenzte, Bereiche der chemischen Zusammensetzung $Y^1_a \cdot Y^2_b \cdot O_{x'}$, deren Größtdurchmesser (längste durch den Schwerpunkt des Bereichs gehende Verbindungsstrecke zweier auf der Oberfläche (Grenzfläche) des Bereichs befindlicher Punkte) 1 nm bis 100 μm , häufig 10 nm bis 500 nm oder 1 μm bis 50 bzw. 25 μm , beträgt.

- 20 Besonders vorteilhafte erfindungsgemäße Multimetallloxidmassen II sind solche, in denen Y^1 Wismut ist.

- Unter diesen werden wiederum jene bevorzugt, die der allgemeinen
 25 Formel III



in der die Varianten folgende Bedeutung haben:

- 30 $Z^2 =$ Molybdän und/oder Wolfram,
 $Z^3 =$ Nickel und/oder Kobalt,
 $Z^4 =$ Thallium, ein Alkalimetall und/oder ein Erdalkalimetall,
 $Z^5 =$ Phosphor, Arsen, Bor, Antimon, Zinn, Cer und/oder Blei,
 35 $Z^6 =$ Silicium, Aluminium, Titan und/oder Zirkonium,
 $Z^7 =$ Kupfer, Silber und/oder Gold,

- $a'' = 0,1 \text{ bis } 1,$
 $b'' = 0,2 \text{ bis } 2,$
 40 $c'' = 3 \text{ bis } 10,$
 $d'' = 0,02 \text{ bis } 2,$
 $e'' = 0,01 \text{ bis } 5, \text{ vorzugsweise } 0,1 \text{ bis } 3,$
 $f'' = 0 \text{ bis } 5,$
 $g'' = 0 \text{ bis } 10,$
 45 $h'' = 0 \text{ bis } 1,$

$x'', y'' =$ Zahlen, die durch die Wertigkeit und Häufigkeit der von Sauerstoff verschiedenen Element in III bestimmt werden,

p", q" = Zahlen, deren Verhältnis p"/q" 0,1 bis 5, vorzugsweise 0,5 bis 2 beträgt,

entsprechen, wobei diejenigen Massen III ganz besonders bevorzugt werden, in denen $Z^{2p} = (\text{Wolfram})_p$ und $Z^{2_{12}} = (\text{Molybdän})_{12}$ ist.

Ferner ist es von Vorteil, wenn wenigstens 25 mol-% (bevorzugt wenigstens 50 mol-% und besonders bevorzugt wenigstens 100 mol-%) des gesamten Anteils $[y^1_a, y^2_b, O_x]_p$ ($[Bi_a Z^{2p} O_x]_p$) der als Festbettkatalysatoren 1 erfindungsgemäß geeigneten Multimetalloxidmassen II (Multimetalloxidmassen III) in den erfindungsgemäß geeigneten Multimetalloxidmassen II (Multimetalloxidmassen III) in Form dreidimensional ausgedehnter, von ihrer lokalen Umgebung aufgrund ihrer von ihrer lokalen Umgebung verschiedenen chemischen Zusammensetzung abgegrenzter, Bereiche der chemischen Zusammensetzung y^1_a, y^2_b, O_x , $[Bi_a Z^{2p} O_x]$ vorliegen, deren Größtdurchmesser im Bereich 1 nm bis 100 µm liegt.

Hinsichtlich der Formgebung gilt bezüglich Multimetalloxidmassen II-Katalysatoren das bei den Multimetalloxidmassen I-Katalysatoren Gesagte.

Die Herstellung von Multimetalloxidmassen II-Aktivmassen ist z.B. in der EP-A 575897 sowie in der DE-A 19855913 beschrieben.

In anwendungstechnisch zweckmäßiger Weise erfolgt die Durchführung der ersten Reaktionsstufe des erfindungsgemäßen Verfahrens in einem Zweizonenrohrbündelreaktor. Eine bevorzugte Variante eines erfindungsgemäß einsetzbaren Zweizonenrohrbündelreaktors offenbart die DE-C 2830765. Aber auch die in der DE-C 2513405, der US-A 3147084, der DE-A 2201528, der EP-A 383224 und der DE-A 2903218 offenbarten Zweizonenrohrbündelreaktoren sind für eine Durchführung der ersten Reaktionsstufe des erfindungsgemäßen Verfahrens geeignet.

D.h., in einfachster Weise befindet sich der erfindungsgemäß zu verwendende Festbettkatalysator 1 in den Metallrohren eines Rohr-bündelreaktors und um die Metallrohre werden zwei voneinander im wesentlichen räumlich getrennte Temperiermedien, in der Regel Salzschnmelzen, geführt. Der Rohrabchnitt, über den sich das jeweilige Salzbad erstreckt, repräsentiert erfindungsgemäß eine Reaktionszone. D.h., in einfachster Weise umströmt ein Salzbad A denjenigen Abschnitt der Rohre (die Reaktionszone A), in welchem sich die oxidative Umsetzung des Propens (beim einfachen Durchgang) bis zum Erreichen eines Umsatzes im Bereich von 40 bis 80 mol-% vollzieht und ein Salzbad B umströmt den Abschnitt der Rohre (die Reaktionszone B), in welchem sich die oxidative An-

schlußumsetzung des Propens (beim einfachen Durchgang) bis zum Erreichen eines Umsatzwertes von wenigstens 90 mol-% vollzieht (bei Bedarf können sich an die erfindungsgemäß anzuwendenden Reaktionszonen A,B weitere Reaktionszonen anschließen, die auf in-
5 dividuellen Temperaturen gehalten werden).

Anwendungstechnisch zweckmäßig umfaßt die erste Reaktionsstufe des erfindungsgemäßen Verfahrens keine weiteren Reaktionszonen. D.h., das Salzbad B umströmt zweckmäßig den Abschnitt der Rohre,
10 in welchem sich die oxidative Anschlußumsetzung des Propens (beim einfachen Durchgang) bis zu einem Umsatzwert ≥ 92 mol-% oder ≥ 94 mol-% oder mehr vollzieht.

Üblicherweise liegt der Beginn der Reaktionszone B hinter dem
15 Heißpunktmaximum der Reaktionszone A. Das Heißpunktmaximum der Reaktionszone B liegt normalerweise unterhalb der Heißpunktmaximaltemperatur der Reaktionszone A.

Die beiden Salzbad A,B können erfindungsgemäß relativ zur Strömungsrichtung des durch die Reaktionsrohre strömenden Reaktionsgasgemisches im Gleichstrom oder im Gegenstrom durch den die Reaktionsrohre umgebenden Raum geführt werden. Selbstverständlich kann erfindungsgemäß auch in der Reaktionszone A eine Gleichströmung und in der Reaktionszone B eine Gegenströmung (oder umge-
25 kehrt) angewandt werden.

Selbstverständlich kann man in allen vorgenannten Fallkonstellationen innerhalb der jeweiligen Reaktionszone der, relativ zu den Reaktionsrohren, erfolgenden Parallelströmung der Salzschnmelze
30 noch eine Querströmung überlagern, so daß die einzelne Reaktionszone einem wie in der EP-A 700714 oder in der EP-A 700893 beschriebenen Rohrbündelreaktor entspricht und insgesamt im Längsschnitt durch das Kontaktrohrbündel ein mäanderförmiger Strömungsverlauf des Wärmeaustauschmittels resultiert.

35 Zweckmäßigerweise wird das Reaktionsgasausgangsgemisch 1 der Katalysatorbeschickung 1 auf die Reaktionstemperatur vorerwärmt zugeführt.

40 Üblicherweise sind in den vorgenannten Rohrbündelreaktoren die Kontaktrohre aus ferritischem Stahl gefertigt und weisen in typischer Weise eine Wanddicke von 1 bis 3 mm auf. Ihr Innendurchmesser beträgt in der Regel 20 bis 30 mm, häufig 22 bis 26 mm. Anwendungstechnisch zweckmäßig beläuft sich die im Rohrbündelbe-
45 hälter untergebrachte Anzahl an Kontaktrohren auf wenigstens 5000, vorzugsweise auf wenigstens 10000. Häufig beträgt die Anzahl der im Reaktionsbehälter untergebrachten Kontaktrohre

16

15000 bis 30000. Rohrbündelreaktoren mit einer oberhalb von 40000 liegenden Anzahl an Kontaktrohren bilden eher die Ausnahme. Innerhalb des Behälters sind die Kontaktrohre im Normalfall homogen verteilt angeordnet, wobei die Verteilung zweckmäßig so
5 gewählt wird, daß der Abstand der zentrischen Innenachsen von zu-
einander nächstliegenden Kontaktrohren (die sogenannte Kontak-
trohrteilung) 35 bis 45 mm beträgt (vgl. z.B. EP-B 468290).

Als Wärmeaustauschmittel eignen sich insbesondere fluide Tempe-
10 riermedien. Besonders günstig ist die Verwendung von Schmelzen
von Salzen wie Kaliumnitrat, Kaliumnitrit, Natriumnitrit und/oder
Natriumnitrat, oder von niedrig schmelzenden Metallen wie Natrium
Quecksilber sowie Legierungen verschiedener Metalle.

15 In der Regel wird bei allen vorstehend erwähnten Konstellationen
der Stromführung in den Zweizonenrohrbündelreaktoren die Fließge-
schwindigkeit innerhalb der beiden erforderlichen Wärmeaus-
tauschmittelkreisläufen so gewählt, daß die Temperatur des Wär-
meaustauschmittels von der Eintrittsstelle in die Reaktionszone
20 bis zur Austrittsstelle aus der Reaktionszone um 0 bis 15°C an-
steigt. D.h., das vorgenannte ΔT kann erfindungsgemäß 1 bis 10°C,
oder 2 bis 8°C oder 3 bis 6°C betragen.

Die Eintrittstemperatur des Wärmeaustauschmittels in die Reakti-
25 onszone A beträgt erfindungsgemäß normalerweise 300 bis 350°C. Die
Eintrittstemperatur des Wärmeaustauschmittels in die Reaktions-
zone B beträgt erfindungsgemäß normalerweise einerseits 305 bis
380°C und liegt andererseits gleichzeitig wenigstens 5°C oberhalb
der Eintrittstemperatur des in die Reaktionszone A eintretenden
30 Wärmeaustauschmittels.

Bevorzugt liegt die Eintrittstemperatur des Wärmeaustauschmittels
in die Reaktionszone B wenigstens 10°C oberhalb der Eintrittstem-
peratur des in die Reaktionszone A eintretenden Wärmeaustau-
35 schmittels. Die Differenz zwischen den Eintrittstemperaturen in
die Reaktionszone A bzw. B kann erfindungsgemäß somit bis zu 20°C,
bis zu 25°C, bis zu 30°C, bis zu 40°C, bis zu 45°C oder bis zu
50°C betragen. Normalerweise wird die vorgenannte Temperaturdiffe-
renz aber nicht mehr als 50°C betragen. Je höher die Proppenbela-
40 stung der Katalysatorschüttung 1 beim erfindungsgemäßen Verfahren
gewählt wird, um so größer sollte die Differenz zwischen der Ein-
trittstemperatur des Wärmeaustauschmittels in die Reaktionszone A
und der Eintrittstemperatur des Wärmeaustauschmittels in die Re-
aktionszone B sein.

Mit Vorteil beträgt die Eintrittstemperatur des Wärmeaustauschmittels in die Reaktionszone B erfindungsgemäß 305 bis 365°C, bzw. 340°C und besonders vorteilhaft 310 bis 330°C.

- 5 Selbstverständlich können beim erfindungsgemäßen Verfahren die beiden Reaktionszonen A, B auch in räumlich voneinander getrennten Rohrbündelreaktoren realisiert sein. Bei Bedarf kann zwischen den beiden Reaktionszonen A, B auch ein Wärmetauscher angebracht werden. Selbstredend können die beiden Reaktionszonen A, B auch
10 als Wirbelbett gestaltet werden.

- Ferner können beim erfindungsgemäßen Verfahren auch Katalysatorschüttungen 1 verwendet werden, deren volumenspezifische Aktivität in Strömungsrichtung des Reaktionsgasausgangsgemisches 1 kontinuierlich, abrupt oder stufenförmig zunimmt (dies kann wie in
15 der WO 98/24746 oder wie in der JP-A 91/294239 beschrieben oder auch durch Verdünnung mit Inertmaterial bewirkt werden). Ebenso können für die beschriebene Zweizonenfahrweise auch die in der EP-A 293224 und in der EP-B 257565 empfohlenen inerten Verdünnungsgase (z.B. nur Propan oder nur Methan etc.) eingesetzt werden.
20 Letzteres bei Bedarf auch kombiniert mit einer in Strömungsrichtung des Reaktionsgasgemisches zunehmenden volumenspezifischen Aktivität der Katalysatorschüttung.

- 25 Es sei an dieser Stelle auch noch einmal darauf hingewiesen, daß für eine Durchführung der Reaktionsstufe 1 des erfindungsgemäßen Verfahrens insbesondere auch der in der DE-AS 2201528 beschriebene Zweizonenrohrbündelreaktortyp verwendet werden kann, der die Möglichkeit beinhaltet, vom heißeren Wärmeaustauschmittel der Reaktionszone B eine Teilmenge an die Reaktionszone A abzuführen,
30 um gegebenenfalls ein Anwärmen eines kalten Reaktionsgasausgangsgemisches oder eines kalten Kreisgases zu bewirken. Ferner kann die Rohrbündelcharakteristik innerhalb einer individuellen Reaktionszone wie in der EP-A 382098 beschrieben gestaltet werden.

- 35 Erfindungsgemäß hat es sich als zweckmäßig erwiesen, das die erste Reaktionsstufe verlassende Produktgasgemisch vor dem Eintritt in die zweite Reaktionsstufe abzukühlen, um so eine Nachvollverbrennung von Teilen des in der ersten Reaktionsstufe gebildeten Acroleins zu unterdrücken. Üblicherweise wird dazu zwischen die
40 beiden Reaktionsstufen ein Nachkühler geschaltet. Dies kann im einfachsten Fall ein indirekter Rohrbündelwärmeüberträger sein. Das Produktgasgemisch wird dabei in der Regel durch die Rohre geführt und um die Rohre wird ein Wärmetauschermedium geführt, dessen Art der für die Rohrbündelreaktoren empfohlenen Wärmetauschermedien entsprechen kann. Mit Vorteil ist das Rohrrinnere mit
45 inerten Füllkörpern (z.B. Spiralen als Edelstahl, Ringe aus Stea-

tit, Kugeln aus Steatit etc.) gefüllt. Selbige verbessern den Wärmeaustausch und fangen gegebenenfalls aus der Festbettkatalysatorschüttung der ersten Reaktionsstufe sublimierendes Molybdäntrioxid vor einem Eintritt desselben in die zweite Reaktionsstufe ab. Es ist von Vorteil, wenn der Nachkühler aus mit Zinksilicatsfarbe beschichtetem rostfreiem Stahl gefertigt ist.

Anwendungstechnisch zweckmäßig wird das Produktgasgemisch der ersten Reaktionsstufe in den vorstehend beschriebenen Nachkühler auf eine Temperatur von 210 bis 290°C, häufig 220 bis 260°C oder 225 bis 245°C abgekühlt. D.h., die Abkühlung des Produktgasgemisches der ersten Reaktionsstufe kann durchaus auf Temperaturen erfolgen, die unterhalb der Temperatur der Reaktionszone C liegen. Die beschriebene Nachkühlung ist jedoch keineswegs zwingend und kann insbesondere dann in aller Regel entfallen, wenn der Weg des Produktgasgemisches von der ersten Reaktionsstufe in die zweite Reaktionsstufe kurz gehalten wird. Üblicherweise wird das erfindungsgemäße Verfahren ferner so verwirklicht, daß man den Sauerstoffbedarf in der zweiten Reaktionsstufe nicht bereits durch einen entsprechend hohen Sauerstoffgehalt des Reaktionsgasausgangsgemisches 1 deckt, sondern den benötigten Sauerstoff im Bereich zwischen erster und zweiter Reaktionsstufe zugibt. Dies kann vor, während, nach und/oder zur Nachkühlung erfolgen. Als Quelle für den in der zweiten Reaktionsstufe erforderlichen molekularen Sauerstoff kommen sowohl reiner Sauerstoff als auch Gemische aus Sauerstoff und Inertgas, z.B. Luft oder an molekularem Stickstoff entreicherte Luft (z.B. ≥ 90 Vol-% O_2 , ≤ 10 Vol-% N_2) in Betracht. Die Zugabe der Sauerstoffquelle erfolgt regelmäßig in auf den Reaktionsdruck komprimierter Form.

30

Der Acroleinanteil im so erzeugten Reaktionsgasausgangsgemisch 2 kann erfindungsgemäß z.B. bei Werten von 3 bis 15 Vol-%, häufig bei 4 bis 10 Vol-% bzw. 5 bis 8 Vol-% liegen (jeweils bezogen auf das Gesamtvolumen).

35

Erfindungsgemäß muß das molare Verhältnis von O_2 :Acrolein im Reaktionsgasausgangsgemisch 2 ≥ 1 betragen. Üblicherweise wird dieses Verhältnis bei Werten ≤ 3 liegen. Häufig wird das molare Verhältnis von O_2 :Acrolein im Reaktionsgasausgangsgemisch 2

erfindungsgemäß 1 bis 2 bzw. 1 bis 1,5 betragen. Häufig wird man das erfindungsgemäße Verfahren mit einem im Reaktionsgasausgangsgemisch 2 vorliegenden Acrolein:Sauerstoff:Wasserdampf:Inertgas-Volumenverhältnis (N_1) von 1:(1 bis 3):(0 bis 20):(3 bis 30), vorzugsweise von 1:(1 bis 3):(0,5 bis 10):(7 bis 10) ausführen.

45

Der Arbeitsdruck kann in der zweiten Reaktionsstufe sowohl unterhalb von Normaldruck (z.B. bis zu 0,5 bar) als auch oberhalb von Normaldruck liegen. Typischerweise wird der Arbeitsdruck in der zweiten Reaktionsstufe erfindungsgemäß bei Werten von 1 bis 5
15 bar, häufig 1 bis 3 bar liegen. Normalerweise wird der Reaktionsdruck in der zweiten Reaktionsstufe 100 bar nicht überschreiten.

Bevorzugt erstreckt sich die Reaktionszone C bis zu einem Acroleinumsatz von 65 bis 80 mol-%. Außerdem liegt die Temperatur der
10 Reaktionszone C mit Vorteil bei 245 bis 260°C. Die Temperatur der Reaktionszone D liegt vorzugsweise wenigstens 20°C oberhalb der Temperatur der Reaktionszone D und beträgt vorteilhaft 265 bis 285°C.

15 Je höher die Acroleinbelastung der Katalysatorschüttung 2 beim erfindungsgemäßen Verfahren gewählt wird, um so größer sollte die Differenz zwischen der Temperatur der Reaktionszone C und der Temperatur der Reaktionszone D gewählt werden. Normalerweise wird die vorgenannte Temperaturdifferenz beim erfindungsgemäßen Ver-
20 fahren aber nicht mehr als 40°C betragen. D.h., die Differenz zwischen der Temperatur der Reaktionszone C und der Temperatur der Reaktionszone D kann erfindungsgemäß bis zu 15°C, bis zu 25°C, bis zu 30°C, bis zu 35°C oder bis zu 40°C betragen.

25 Im übrigen kann der auf den einfachen Durchgang der zweiten Reaktionsstufe bezogene Acroleinumsatz beim erfindungsgemäßen Verfahren ≥ 92 mol-%, oder ≥ 94 mol-%, oder ≥ 96 mol-%, oder ≥ 98 mol-% und häufig sogar ≥ 99 mol-% betragen. Die Selektivität der Acrylsäurebildung, bezogen auf umgesetztes Acrolein, wird dabei regel-
30 mäßig ≥ 92 mol-%, bzw. ≥ 94 mol-%, häufig ≥ 95 mol-% oder ≥ 96 mol-% bzw. ≥ 97 mol-% betragen.

In überraschender Weise gilt das Vorgenannte nicht nur bei Acroleinbelastungen der Katalysatorschüttung 2 von ≥ 140 Nl/l·h bzw. \geq
35 150 Nl/l·h oder von ≥ 160 Nl/l·h bzw. ≥ 170 Nl/l·h oder ≥ 175 Nl/l·h bzw. ≥ 180 Nl/l·h, sondern auch bei Acroleinbelastungen der Katalysatorschüttung von ≥ 185 Nl/l·h oder von ≥ 190 Nl/l·h bzw. ≥ 200 Nl/l·h oder ≥ 210 Nl/l·h sowie bei Belastungswerten ≥ 220 Nl/l·h oder ≥ 230 Nl/l·h bzw. 240 Nl/l·h oder ≥ 250 Nl/l·h.

40

Dabei überrascht, daß vorgenannte Werte selbst dann erreichbar sind, wenn das in der zweiten Reaktionsstufe erfindungsgemäß verwendete Inertgas zu ≥ 30 Vol-%, oder zu ≥ 40 Vol-%, oder zu ≥ 50 Vol-%, oder zu ≥ 60 Vol-%, oder zu ≥ 70 Vol-%, oder zu
45 ≥ 80 Vol-%, oder zu ≥ 90 Vol-%, oder zu ≥ 95 Vol-% aus molekularem Stickstoff besteht.

20

In zweckmäßiger Weise wird das inerte Verdünnungsgas beim erfindungsgemäßen Verfahren in der zweiten Reaktionsstufe zu 5 bis 20 Gew.-% aus H_2O (wird in der ersten Reaktionsstufe gebildet) und zu 70 bis 90 Vol.-% aus N_2 bestehen.

5

Außer den in dieser Schrift genannten Bestandteilen enthält das Reaktionsgasausgangsgemisch 2 normalerweise im wesentlichen keine weiteren Komponenten.

- 10 Bei Acroleinbelastungen des zweiten Festbettkatalysators oberhalb von 250 $Nl/l \cdot h$ wird für das Reaktionsgasausgangsgemisch 2 die Mitverwendung von inerten Verdünnungsgasen wie Propan, Ethan, Methan, Butan, Pentan, CO_2 , CO , Wasserdampf und/oder Edelgasen empfohlen. Selbstverständlich können diese Gase aber auch bereits 15 bei geringeren Acroleinbelastungen mitverwendet werden. Es überrascht, daß das erfindungsgemäße Verfahren mit einer über beide Reaktionszonen C, D betrachtet homogenen, d.h., chemisch einheitlichen, Katalysatorschüttung durchgeführt werden kann, ohne in nennenswerten Umfang Umsatz- und/oder Selektivitätseinbußen zu 20 erleiden.

- Normalerweise wird beim erfindungsgemäßen Verfahren die Acroleinbelastung des zweiten Festbettkatalysators den Wert von 600 $Nl/l \cdot h$ nicht überschreiten. In typischer Weise liegen die Acroleinbelas- 25 stungen der Katalysatorschüttung 2 beim erfindungsgemäßen Verfahren ohne nennenswerten Verlust von Umsatz und Selektivität bei Werten $\leq 300 Nl/l \cdot h$, häufig bei Werten $\leq 250 Nl/l \cdot h$.

- In der Regel wird beim erfindungsgemäßen Verfahren die Acrolein- 30 belastung der zweiten Katalysatorschüttung etwa 10 $Nl/l \cdot h$, häufig etwa 20 bzw. 25 $Nl/l \cdot h$ unterhalb der Propenbelastung der ersten Katalysatorschüttung liegen. Dies ist primär darauf zurückzuführen, daß in der ersten Reaktionsstufe sowohl Umsatz als auch Selektivität in der Regel nicht 100 % erreichen. Ferner wird der 35 Sauerstoffbedarf der zweiten Reaktionsstufe üblicherweise durch Luft gedeckt.

- Beachtenswerterweise liegt beim erfindungsgemäßen Verfahren die über beide Reaktionsstufen bilanzierte Selektivität der Acryl- 40 säurebildung, bezogen auf umgesetztes Propen, selbst bei höchsten Propen- und Acroleinbelastungen in der Regel bei Werten $\geq 83 \text{ mol-\%}$, häufig bei $\geq 85 \text{ mol-\%}$ oder $\geq 88 \text{ mol-\%}$, oft bei $\geq 90 \text{ mol-\%}$ oder 93 mol-%.

Als Festbettkatalysatoren 2 kommen für die Gasphasenkatalytische Acroleinoxidation in der zweiten Reaktionsstufe alle diejenigen in Betracht, deren Aktivmasse wenigstens ein Mo und V enthalten- des Multimetalloxid ist.

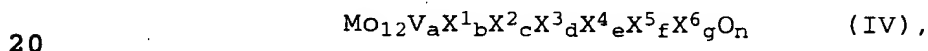
5

Solchermaßen geeignete Multimetalloxidkatalysatoren können beispielsweise der US-A 3 775 474, der US-A 3 954 855, der US-A 3 893 951 und der US-A 4 339 355 entnommen werden. Ferner eignen sich in besonderer Weise die Multimetalloxidmassen der

10 EP-A 427 508, der DE-A 2 909 671, der DE-C 31 51 805, der DE-AS 2 626 887, der DE-A 43 02 991, der EP-A 700 893, der EP-A 714 700 und der DE-A 19 73 6105. Besonders bevorzugt sind in diesem Zusammenhang die beispielhaften Ausführungsformen der EP-A 714 700 sowie der DE-A 19 73 6105.

15

Eine Vielzahl der als Festbettkatalysatoren 2 geeigneten Multimetalloxidaktivmassen läßt sich unter der allgemeinen Formel IV



in der die Variablen folgende Bedeutung haben:

- $\text{X}^1 =$ W, Nb, Ta, Cr und/oder Ce,
25 $\text{X}^2 =$ Cu, Ni, Co, Fe, Mn und/oder Zn,
 $\text{X}^3 =$ Sb und/oder Bi,
 $\text{X}^4 =$ eines oder mehrere Alkalimetalle,
 $\text{X}^5 =$ eines oder mehrere Erdalkalimetalle,
 $\text{X}^6 =$ Si, Al, Ti und/oder Zr,
30 $a =$ 1 bis 6,
 $b =$ 0,2 bis 4,
 $c =$ 0,5 bis 18,
 $d =$ 0 bis 40,
 $e =$ 0 bis 2,
35 $f =$ 0 bis 4,
 $g =$ 0 bis 40 und
 $n =$ eine Zahl, die durch die Wertigkeit und Häufigkeit der von Sauerstoff verschiedenen Elemente in IV bestimmt wird,

40 subsummieren.

Bevorzugte Ausführungsformen innerhalb der aktiven Multimetall-oxide IV sind jene, die von nachfolgenden Bedeutungen der Variablen der allgemeinen Formel IV erfaßt werden:

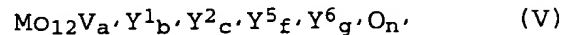
45

- $\text{X}^1 =$ W, Nb, und/oder Cr,
 $\text{X}^2 =$ Cu, Ni, Co, und/oder Fe,

22

- $X^3 =$ Sb,
 $X^4 =$ Na und/oder K,
 $X^5 =$ Ca, Sr und/oder Ba,
 $X^6 =$ Si, Al, und/oder Ti,
5 a = 1,5 bis 5,
b = 0,5 bis 2,
c = 0,5 bis 3,
d = 0 bis 2,
e = 0 bis 0,2,
10 f = 0 bis 1 und
n = eine Zahl, die durch die Wertigkeit und Häufigkeit der von Sauerstoff verschiedenen Elemente in IV bestimmt wird.

Ganz besonders bevorzugte Multimetalloxide IV sind jedoch jene
15 der allgemeinen Formel V



20

mit

- $Y^1 =$ W und/oder Nb,
 $Y^2 =$ Cu und/oder Ni,
25 $Y^5 =$ Ca und/oder Sr,
 $Y^6 =$ Si und/oder Al,
 $a' =$ 2 bis 4,
 $b' =$ 1 bis 1,5,
 $c' =$ 1 bis 3,
30 $f' =$ 0 bis 0,5
 $g' =$ 0 bis 8 und
 $n' =$ eine Zahl, die durch die Wertigkeit und Häufigkeit der von Sauerstoff verschiedenen Elementen in V bestimmt wird.

- 35 Die erfindungsgemäß geeigneten Multimetalloxidaktivmassen (IV) sind in sich bekannter, z.B. in der DE-A 4335973 oder in der EP-A 714700 offenbarter, Weise erhältlich.

- Prinzipiell können erfindungsgemäß als Festbettkatalysatoren 2 ge-
40 eignete Multimetalloxidaktivmassen, insbesondere solche der allgemeinen Formel IV, in einfacher Weise dadurch hergestellt werden, daß man von geeigneten Quellen ihrer elementaren Konstituenten ein möglichst inniges, vorzugsweise feinteiliges, ihrer Stöchiometrie entsprechend zusammengesetztes, Trockengemisch er-
45 zeugt und dieses bei Temperaturen von 350 bis 600°C calciniert. Die Calcination kann sowohl unter Inertgas als auch unter einer oxidativen Atmosphäre wie z.B. Luft (Gemisch aus Inertgas und

Sauerstoff) sowie auch unter reduzierender Atmosphäre (z.B. Gemische aus Inertgas und reduzierenden Gasen wie H_2 , NH_3 , CO , Methan und/oder Acrolein oder die genannten reduzierend wirkenden Gase für sich) durchgeführt werden. Die Calcinationsdauer kann einige 5 Minuten bis einige Stunden betragen und nimmt üblicherweise mit der Temperatur ab. Als Quellen für die elementaren Konstituenten der Multimetalloxidaktivmassen IV kommen solche Verbindungen in Betracht, bei denen es sich bereits um Oxide handelt und/oder um solche Verbindungen, die durch Erhitzen, wenigstens in Anwesen- 10 heit von Sauerstoff, in Oxide überführbar sind.

Das innige Vermischen der Ausgangsverbindungen zur Herstellung von Multimetalloxidmassen IV kann in trockener oder in nasser Form erfolgen. Erfolgt es in trockener Form, so werden die 15 Ausgangsverbindungen zweckmäßigerweise als feinteilige Pulver eingesetzt und nach dem Mischen und gegebenenfalls Verdichten der Calcinierung unterworfen. Vorzugsweise erfolgt das innige Vermischen jedoch in nasser Form.

20 Üblicherweise werden dabei die Ausgangsverbindungen in Form einer wäßrigen Lösung und/oder Suspension miteinander vermischt. Besonders innige Trockengemische werden beim beschriebenen Mischverfahren dann erhalten, wenn ausschließlich von in gelöster Form vorliegenden Quellen der elementaren Konstituenten ausgegangen 25 wird. Als Lösungsmittel wird bevorzugt Wasser eingesetzt. Anschließend wird die erhaltene wäßrige Masse getrocknet, wobei der Trocknungsprozeß vorzugsweise durch Sprühtrocknung der wäßrigen Mischung mit Austrittstemperaturen von 100 bis 150°C erfolgt.

30 Die erfindungsgemäß als Festbettkatalysatoren 2 geeigneten Multimetalloxidmassen, insbesondere jene der allgemeinen Formel IV, können für das erfindungsgemäße Verfahren sowohl in Pulverform als auch zu bestimmten Katalysatorgeometrien geformt eingesetzt werden, wobei die Formgebung vor oder nach der abschließenden 35 Calcination erfolgen kann. Beispielsweise können aus der Pulverform der Aktivmasse oder ihrer uncalcinierten Vorläufermasse durch Verdichten zur gewünschten Katalysatorgeometrie (z.B. durch Tablettieren, Extrudieren oder Strangpressen) Vollkatalysatoren hergestellt werden, wobei gegebenenfalls Hilfsmittel wie z.B. 40 Graphit oder Stearinsäure als Gleitmittel und/oder Formhilfsmittel und Verstärkungsmittel wie Mikrofasern aus Glas, Asbest, Siliciumcarbid oder Kaliumtitanat zugesetzt werden können. Geeignete Vollkatalysatorgeometrien sind z.B. Vollzylinder oder Hohlzylinder mit einem Außendurchmesser und einer Länge von 2 bis 45 10 mm. Im Fall der Hohlzylinder ist eine Wandstärke von 1 bis 3 mm zweckmäßig. Selbstverständlich kann der Vollkatalysator auch

Kugelgeometrie aufweisen, wobei der Kugeldurchmesser 2 bis 10 mm betragen kann.

Selbstverständlich kann die Formgebung der pulverförmigen Aktiv-
5 masse oder ihrer pulverförmigen, noch nicht calcinierten, Vorläufermasse auch durch Aufbringen auf vorgeformte inerte Katalysatorträger erfolgen. Die Beschichtung der Trägerkörper zur Herstellung der Schalenkatalysatoren wird in der Regel in einem geeigneten drehbaren Behälter ausgeführt, wie es z.B. aus der
10 DE-A 2909671, der EP-A 293859 oder aus der EP-A 714700 bekannt ist.

Zweckmäßigerweise wird zur Beschichtung der Trägerkörper die aufzubringende Pulvermasse befeuchtet und nach dem Aufbringen,
15 z.B. mittels heißer Luft, wieder getrocknet. Die Schichtdicke der auf den Trägerkörper aufgebrachten Pulvermasse wird zweckmäßigerweise im Bereich 10 bis 1000 μm , bevorzugt im Bereich 50 bis 500 μm und besonders bevorzugt im Bereich 150 bis 250 μm liegend, gewählt.

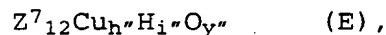
20 Als Trägermaterialien können dabei übliche poröse oder unporöse Aluminiumoxide, Siliciumdioxid, Thoriumdioxid, Zirkondioxid, Siliciumcarbid oder Silikate wie Magnesium- oder Aluminiumsilikat verwendet werden. Die Trägerkörper können regelmäßig oder unregelmäßig geformt sein, wobei regelmäßig geformte Trägerkörper mit deutlich ausgebildeter Oberflächenrauigkeit, z.B. Kugeln oder
25 Hohlzylinder, bevorzugt werden. Geeignet ist die Verwendung von im wesentlichen unporösen, oberflächenrauen, kugelförmigen Trägern aus Steatit, deren Durchmesser 1 bis 8 mm, bevorzugt 4 bis
30 5 mm beträgt. Geeignet ist aber auch die Verwendung von Zylindern als Trägerkörper, deren Länge 2 bis 10 mm und deren Außendurchmesser 4 bis 10 mm beträgt. Im Fall von erfindungsgemäß geeigneten Ringen als Trägerkörper liegt die Wanddicke darüber hinaus üblicherweise bei 1 bis 4 mm. Erfindungsgemäß bevorzugt zu ver-
35 wendende ringförmige Trägerkörper besitzen eine Länge von 3 bis 6 mm, einen Außendurchmesser von 4 bis 8 mm und eine Wanddicke von 1 bis 2 mm. Erfindungsgemäß geeignet sind vor allem auch Ringe der Geometrie 7 mm x 3 mm x 4 mm (Außendurchmesser x Länge x Innendurchmesser) als Trägerkörper. Die Feinheit
40 der auf die Oberfläche des Trägerkörpers aufzubringenden katalytisch aktiven Oxidmassen wird selbstredend an die gewünschte Schalendicke angepaßt (vgl. EP-A 714 700).

Günstige erfindungsgemäß als Festbettkatalysatoren 2 zu verwen-
45 dende Multimetalloxidaktivmassen sind ferner Massen der allgemeinen Formel VI,

in der die Variablen folgende Bedeutung haben:

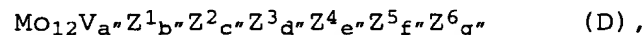
- 5 D = $\text{Mo}_{12}\text{V}_a\text{Z}^1_b\text{Z}^2_c\text{Z}^3_d\text{Z}^4_e\text{Z}^5_f\text{Z}^6_g\text{O}_x$,
 E = $\text{Z}^7_{12}\text{Cu}_h\text{H}_i\text{O}_y$,
 Z^1 = W, Nb, Ta, Cr und/oder Ce,
 Z^2 = Cu, Ni, Co, Fe, Mn und/oder Zn,
 Z^3 = Sb und/oder Bi,
 10 Z^4 = Li, Na, K, Rb, Cs und/oder H
 Z^5 = Mg, Ca, Sr und/oder Ba,
 Z^6 = Si, Al, Ti und/oder Zr,
 Z^7 = Mo, W, V, Nb und/oder Ta,
 15 a'' = 1 bis 8,
 b'' = 0,2 bis 5,
 c'' = 0 bis 23,
 d'' = 0 bis 50,
 e'' = 0 bis 2,
 20 f'' = 0 bis 5,
 g'' = 0 bis 50,
 h'' = 4 bis 30,
 i'' = 0 bis 20 und
 x'', y'' = Zahlen, die durch die Wertigkeit und Häufigkeit der von
 25 Sauerstoff verschiedenen Element in VI bestimmt werden
 und
 p, q = von Null verschiedene Zahlen, deren Verhältnis p/q 160:1
 bis 1:1 beträgt,

- 30 und die dadurch erhältlich sind, daß man eine Multimetalloxid-
 masse E



- 35 in feinteiliger Form getrennt vorbildet (Ausgangsmasse 1) und an-
 schließend die vorgebildete feste Ausgangsmasse 1 in eine wäßrige
 Lösung, eine wäßrige Suspension oder in ein feinteiliges Trocken-
 gemisch von Quellen der Elemente Mo, V, Z^1 , Z^2 , Z^3 , Z^4 , Z^5 , Z^6 , die
 die vorgenannten Elemente in der Stöchiometrie D

40



enthält (Ausgangsmasse 2), im gewünschten Mengenverhältnis $p:q$
 einarbeitet, die dabei gegebenenfalls resultierende wäßrige

- 45 Mischung trocknet, und die so gegebene trockene Vorläufermasse

vor oder nach ihrer Trocknung zur gewünschten Katalysatorgeometrie bei Temperaturen von 250 bis 600°C calciniert.

Bevorzugt sind die Multimetalloxidmassen VI, bei denen die Einarbeitung der vorgebildeten festen Ausgangsmasse 1 in eine wäßrige Ausgangsmasse 2 bei einer Temperatur $\leq 70^\circ\text{C}$ erfolgt. Eine detaillierte Beschreibung der Herstellung von Multimetalloxidmassen VI-Katalysatoren enthalten z.B. die EP-A 668104, die DE-A 19736105 und die DE-A 19528646.

10

Hinsichtlich der Formgebung gilt bezüglich Multimetalloxidmassen VI-Katalysatoren das bei den Multimetalloxidmassen IV-Katalysatoren Gesagte.

15 In anwendungstechnisch zweckmäßiger Weise erfolgt die Durchführung der zweiten Reaktionsstufe des erfindungsgemäßen Verfahrens in einem Zweizonenrohrbündelreaktor. Eine bevorzugte Variante eines für die zweite Reaktionsstufe erfindungsgemäß einsetzbaren Zweizonenrohrbündelreaktors offenbart die DE-C 2830765. Aber auch
20 die in der DE-C 2513405, der US-A 3147084, der DE-A 2201528, der EP-A 383224 und der DE-A 2903582 offenbarten Zweizonenrohrbündelreaktoren sind für eine Durchführung der zweiten Reaktionsstufe des erfindungsgemäßen Verfahrens geeignet.

25 D.h., in einfacher Weise befindet sich der erfindungsgemäß zu verwendende Festbettkatalysator in den Metallrohren eines Rohrbündelreaktors und um die Metallrohre werden zwei voneinander im wesentlichen räumlich getrennte Temperiermedien, in der Regel Salzschnmelzen, geführt. Der Rohrabchnitt, über den sich das je-
30 weilige Salzbad erstreckt, repräsentiert erfindungsgemäß eine Reaktionszone.

D.h., in einfacher Weise umströmt ein Salzbad C diejenigen Abschnitte der Rohre (die Reaktionszone C), in welchem sich die
35 oxidative Umsetzung des Acroleins (beim einfachen Durchgang) bis zum Erreichen eines Umsatzwertes im Bereich von 55 bis 85 mol.% vollzieht und ein Salzbad D umströmt den Abschnitt der Rohre (die Reaktionszone D), in welchem sich die oxidative Anschlußumsetzung des Acroleins (beim einfachen Durchgang) bis zum Erreichen eines
40 Umsatzwertes von wenigstens 90 mol.% vollzieht (bei Bedarf können sich an die erfindungsgemäß anzuwendenden Reaktionszonen C,D weitere Reaktionszonen anschließen, die auf individuellen Temperaturen gehalten werden).

45 Anwendungstechnisch zweckmäßig umfaßt die Reaktionsstufe 2 des erfindungsgemäßen Verfahrens keine weiteren Reaktionszonen. D.h., das Salzbad D umströmt zweckmäßig den Abschnitt der Rohre, in

oder Natriumnitrat, oder von niedrig schmelzenden Metallen wie Natrium, Quecksilber sowie Legierungen verschiedener Metalle.

- In der Regel wird bei allen vorstehend erwähnten Konstellationen
- 5 der Stromführung in den Zweizonenrohrbündelreaktoren die Fließgeschwindigkeit innerhalb der beiden erforderlichen Wärmeaustauschmittelkreisläufe so gewählt, daß die Temperatur des Wärmeaustauschmittels von der Eintrittsstelle in die Reaktionszone bis zur Austrittsstelle aus der Reaktionszone um 0 bis 15°C ansteigt.
- 10 D.h., das vorgenannte ΔT kann erfindungsgemäß 1 bis 10°C, oder 2 bis 8°C oder 3 bis 6°C betragen.

- Die Eintrittstemperatur des Wärmeaustauschmittels in die Reaktionszone C beträgt erfindungsgemäß normalerweise 230 bis
- 15 270°C. Die Eintrittstemperatur des Wärmeaustauschmittels in die Reaktionszone D beträgt erfindungsgemäß normalerweise einerseits 250°C bis 300°C und liegt andererseits gleichzeitig wenigstens 10°C oberhalb der Eintrittstemperatur des in die Reaktionszone C eintretenden Wärmeaustauschmittels.

- 20 Bevorzugt liegt die Eintrittstemperatur des Wärmeaustauschmittels in die Reaktionszone D wenigstens 20° oberhalb der Eintrittstemperatur des in die Reaktionszone C eintretenden Wärmeaustauschmittels. Die Differenz zwischen den Eintrittstemperaturen in die
- 25 Reaktionszone C bzw. D kann erfindungsgemäß somit bis zu 15°C, bis zu 25°C, bis zu 30°C, bis zu 35°C oder bis zu 40°C betragen. Normalerweise wird die vorgenannte Temperatur aber nicht mehr als 50°C betragen. Je höher die Acroleinbelastung der Katalysator-
- 30 schüttung 2 beim erfindungsgemäßen Verfahren gewählt wird, um so größer sollte die Differenz zwischen der Eintrittstemperatur des Wärmeaustauschmittels in die Reaktionszone C und der Eintrittstemperatur des Wärmeaustauschmittels in die Reaktionszone D sein. Bevorzugt liegt die Eintrittstemperatur in die Reaktions-
- 35 Reaktionszone D bei 265 bis 285°C.

- Selbstverständlich können beim erfindungsgemäßen Verfahren die beiden Reaktionszonen C, D auch in räumlich voneinander getrennten Rohr-
bündelreaktoren realisiert sein. Bei Bedarf kann zwischen
- 40 den beiden Reaktionszonen C, D auch ein Wärmetauscher angebracht werden. Selbstredend können die beiden Reaktionszonen C, D auch als Wirbelbett gestaltet werden.

- Ferner können beim erfindungsgemäßen Verfahren auch Katalysator-
- 45 schüttungen 2 verwendet werden, deren volumenspezifische Aktivität in Strömungsrichtung des Reaktionsgasgemisches kontinuierlich, abrupt oder stufenförmig zunimmt (dies kann z.B. durch

Verdünnung mit Inertmaterial oder Variation der Aktivität des Multimetalloxids bewirkt werden).

Ebenso können für die beschriebene Zweizonenfahrweise in der
5 zweiten Reaktionsstufe auch die in der EP-A 293224 und in der
EP-B 257565 empfohlenen inerten Verdünnungsgase (z.B. nur Propan,
oder nur Methan etc.) eingesetzt werden. Letzteres bei Bedarf
auch kombiniert mit einer in Strömungsrichtung des Reaktionsgas-
gemisches abnehmenden volumenspezifischen Aktivität der Katalysa-
10 torschüttung 2.

Es sei an dieser Stelle auch noch einmal darauf hingewiesen, daß
für eine Durchführung in der zweiten Reaktionsstufe des
erfindungsgemäßen Verfahrens insbesondere auch der in der DE-AS
15 2201528 beschriebene Zweizonenrohrbündelreaktortyp verwendet wer-
den kann, der die Möglichkeit beinhaltet, vom heißeren Wärmeaus-
tauschmittel der Reaktionszone D eine Teilmenge an die Reaktions-
zone C abzuführen, um gegebenenfalls ein Anwärmen eines zu kalten
Reaktionsgasausgangsgemisches 2 oder eines kalten Kreisgases zu
20 bewirken. Ferner kann die Rohrbündelcharakteristik, innerhalb ei-
ner individuellen Reaktionszone wie in der EP-A 382 098 beschrie-
ben gestaltet werden.

Das erfindungsgemäße Verfahren eignet sich insbesondere für eine
25 kontinuierliche Durchführung. Es überrascht, daß es bei einmalig-
em Durchgang eine erhöhte Raum-Zeit-Ausbeute der Wertproduktbil-
dung ermöglicht, ohne gleichzeitig die Selektivität der Wertpro-
duktbildung nennenswert zu beeinträchtigen. Vielmehr wird in der
Regel tendenziell sogar eine erhöhte Selektivität der Wertpro-
30 duktbildung beobachtet. Letzteres ist vermutlich darauf zurückzu-
führen, daß das erfindungsgemäße Verfahren aufgrund der im Be-
reich des erhöhten Propen- bzw. Acroleinumsatzes vorliegenden er-
höhten Temperaturen eine geringere Readsorption von gebildetem
Acrolein/Acrylsäure an den Festbettkatalysator bedingt.

35 Bemerkenswert ist ferner, daß die Katalysatorlebensdauer beim
erfindungsgemäßen Verfahren trotz der extremen Katalysator-
belastung mit Reaktanden im vollen Umfang zu befriedigen vermag.

40 Bei dem erfindungsgemäßen Verfahren wird keine reine Acrylsäure
sondern ein Gemisch erhalten, von dessen Nebenkompenten die
Acrylsäure in an sich bekannter Weise (z.B. rektifikativ und/oder
kristallisativ) abgetrennt werden kann. Nicht umgesetztes
Acrolein, Propen sowie verwendetes und/oder im Verlauf der Reak-
45 tion gebildetes inertes Verdünnungsgas können in die Gasphasen-
oxidation rückgeführt werden. Bei der erfindungsgemäßen zweistu-
figen, von Propen ausgehenden Gasphasenoxidation erfolgt die

Rückführung zweckmäßigerweise in die erste Oxidationsstufe. Natürlich kann die erfindungsgemäße Verfahrensweise bei Bedarf auch im Fall konventioneller Propanlasten angewendet werden.

- 5 Im übrigen sind in dieser Schrift Umsatz, Selektivität und Verweilzeit, falls nichts anderes erwähnt wird, wie folgt definiert:

$$10 \quad \text{Umsatz an Edukt (\%)} = \frac{\text{Molzahl umgesetztes Edukt}}{\text{Molzahl eingesetztes Edukt}} \times 100$$

$$15 \quad \begin{array}{l} \text{Selektivität der} \\ \text{Produktbildung} \end{array} = \frac{\text{Molzahl Edukt umgesetzt zu Produkt}}{\text{Molzahl umgesetztes Edukt}} \times 100$$

$$20 \quad \text{Verweilzeit (sec.)} = \frac{\begin{array}{l} \text{mit Katalysator gefülltes} \\ \text{Leervolumen des Reaktors (l)} \end{array}}{\begin{array}{l} \text{durchgesetzte Menge Reaktions-} \\ \text{gasausgangsgemisch (Nl)} \end{array}} \times 3600$$

Beispiele und Vergleichsbeispiele

25 a) Herstellung des Festbettkatalysators 1

1. Herstellung einer Ausgangsmasse 1

30 In 775 kg einer wäßrigen salpetersauren Wismutnitratlösung (11,2 Gew.-% Bi, freie Salpetersäure 3 bis 5 Gew.-%; Massendichte: 1,22 bis 1,27 g/ml) wurden bei 25°C portionsweise 209,3 kg Wolframsäure (72,94 Gew.-% W) eingerührt. Das resultierende wäßrige Gemisch wurde anschließend noch 2 h bei 25°C gerührt und anschließend sprühgetrocknet.

35

Die Sprühtrocknung erfolgte in einem Drehscheibensprühturm im Gegenstrom bei einer Gaseintrittstemperatur von $300 \pm 10^\circ\text{C}$ und einer Gasaustrittstemperatur von $100 \pm 10^\circ\text{C}$. Das erhaltene Sprühpulver wurde anschließend bei einer Temperatur im Bereich von 780

40 bis 810°C calciniert (im luftdurchströmten Drehrohrofen ($1,54 \text{ m}^3$ Innenvolumen, $200 \text{ Nm}^3 \text{ Luft/h}$)). Wesentlich bei der genauen Einstellung der Calcinationstemperatur ist, daß sie an der angestrebten Phasenzusammensetzung des Calcinationsprodukts orientiert zu erfolgen hat. Gewünscht sind die Phasen WO_3 (monoklin) und $\text{Bi}_2\text{W}_2\text{O}_9$, unerwünscht ist das Vorhandensein von $\gamma\text{-Bi}_2\text{WO}_6$ (Russellit). Sollte daher nach der Calcination die Verbindung $\gamma\text{-Bi}_2\text{WO}_6$ anhand eines Reflexes im Pulverröntgendiffraktogramm bei einem

31

Reflexwinkel von $2\Theta = 28,4^\circ$ (CuK α -Strahlung) noch nachweisbar sein, so ist die Präparation zu wiederholen und die Calcinationstemperatur innerhalb des angegebenen Temperaturbereichs zu erhöhen, bis das Verschwinden des Reflexes erreicht wird. Das so

5 erhaltene vorgebildete calcinierte Mischoxid wurde gemahlen, so daß der X₅₀-Wert (vgl. Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, 6th Edition (1998) Electronic Release, Kapitel 3.1.4 oder DIN 66141) der resultierenden Körnung 5 μm betrug. Das Mahlgut wurde dann mit 1 Gew.-% (bezogen auf das Mahlgut) fein-

10 teiligem SiO₂ (Rüttelgewicht 150 g/l; X₅₀-Wert der SiO₂-Partikel betrug 10 μm , die BET-Oberfläche betrug 100 m²/g).

2. Herstellung einer Ausgangsmasse 2

15 Eine Lösung A wurde hergestellt indem man bei 60°C unter Rühren in 600 l Wasser 213 kg Ammoniumheptamolybdat löste und die resultierende Lösung unter Aufrechterhaltung der 60°C und Rühren mit 0,97 kg einer 20°C aufweisenden wäßrigen Kaliumhydroxidlösung (46,8 Gew.-% KOH) versetzte.

20

Eine Lösung B wurde hergestellt indem man bei 60°C in 262,9 kg einer wäßrigen Cobaltnitratlösung (12,4 Gew.-% Co) 116,25 kg einer wäßrigen Eisennitratlösung (14,2 Gew.-% Fe) eintrug. Anschließend wurde unter Aufrechterhaltung der 60°C die Lösung B

25 über einen Zeitraum von 30 Minuten kontinuierlich in die vorgelegte Lösung A gepumpt. Anschließend wurde 15 Minuten bei 60°C gerührt. Dann wurden dem resultierenden wäßrigen Gemisch 19,16 kg eines Kieselgels (46,80 Gew.-% SiO₂, Dichte: 1,36 bis 1,42 g/ml, pH 8,5 bis 9,5, Alkaligehalt max. 0,5 Gew.-%) zugegeben und da-

30 nach noch weitere 15 Minuten bei 60°C gerührt.

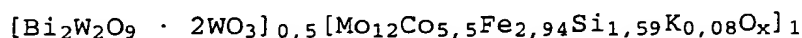
Anschließend wurde in einem Drehscheibensprühturm im Gegenstrom sprühgetrocknet (Gaseintrittstemperatur: $400 \pm 10^\circ\text{C}$, Gasaustrittstemperatur: $140 \pm 5^\circ\text{C}$). Das resultierende Sprühpulver wies einen

35 Glühverlust von ca. 30 Gew.-% auf (3 h bei 600°C glühen).

3. Herstellung der Multimetalloxidaktivmasse

Die Ausgangsmasse 1 wurde mit der Ausgangsmasse 2 in der für eine

40 Multimetalloxidaktivmasse der Stöchiometrie



erforderlichen Menge homogen vermischt. Bezogen auf die vorge-

45 nannte Gesamtmasse wurden zusätzlich 1,5 Gew.-% feinteiliges Graphit (Siebanalyse: min. 50 Gew.-% < 24 μm , max. 10 Gew.-% > 24 μm und < 48 μm , max. 5 Gew.-% > 48 μm , BET-Oberfläche: 6 bis 13 m²/g)

homogen eingemischt. Das resultierende Trockengemisch wurde zu Hohlzylindern mit 3 mm Länge, 5 mm Außendurchmesser und 1,5 mm Wandstärke verpreßt und anschließend wie folgt thermisch behandelt.

5

Im Luft durchströmten Muffelofen (60 l Innenvolumen, 1 l/h Luft pro Gramm Aktivmassevorläufermasse) wurde mit einer Aufheizrate von 180°C/h zunächst von Raumtemperatur (25°C) auf 190°C aufgeheizt. Diese Temperatur wurde für 1 h aufrechterhalten und dann mit einer Aufheizrate von 60°C/h auf 210°C erhöht. Die 210°C wurden wiederum während 1 h aufrechterhalten, bevor sie mit einer Aufheizrate von 60°C/h, auf 230°C erhöht wurden. Diese Temperatur wurde ebenfalls 1 h aufrechterhalten bevor sie, wiederum mit einer Aufheizrate von 60°C/h, auf 265°C erhöht wurde. Die 265°C wurden anschließend ebenfalls während 1 h aufrechterhalten. Danach wurde zunächst auf Raumtemperatur abgekühlt und damit die Zersetzungsphase im wesentlichen abgeschlossen. Dann wurde mit einer Aufheizrate von 180°C/h auf 465°C erhitzt und diese Calcinationstemperatur während 4 h aufrechterhalten. Eine Schüttung aus den resultierenden Vollkatalysatorringen bildete den Festbettkatalysator 1.

b) Herstellung des Festbettkatalysators 2

25 1. Herstellung der katalytisch aktiven Oxidmasse $\text{Mo}_{12}\text{V}_3\text{W}_{1,2}\text{Cu}_{2,4}\text{O}_n$

190 g Kupfer(II)acetatmonohydrat wurden in 2700 g Wasser zu einer Lösung I gelöst. In 5500 g Wasser wurden bei 95°C nacheinander 860 g Ammoniumheptamolybdattetrahydrat, 143 g Ammoniummetavanadat und 126 g Ammoniumparawolframatheptahydrat zu einer Lösung II gelöst. Anschließend wurde die Lösung I auf einmal in die Lösung II eingerührt und anschließend soviel einer 25gew.-%igen wäßrigen NH_3 -Lösung zugesetzt, bis wieder eine Lösung entstand. Diese wurde bei einer Austrittstemperatur von 110°C sprühgetrocknet. Das resultierende Sprühpulver wurde je kg Pulver mit 0,25 kg einer 30gew.-%igen wäßrigen Essigsäurelösung mit einem Knetter der Fa. Werner & Pfleiderer vom Typ ZS1-80 verknetet und anschließend bei einer Temperatur von 110°C während 10 h im Trockenschrank getrocknet.

700 g des so erhaltenen Katalysatorvorläufers wurden in einem Luft/Stickstoffgemisch [(200 l N_2 /15 l Luft)/h] in einem Drehrohrofen (50 cm lang, 12 cm Innendurchmesser) calciniert. Im Rahmen der Calcinierung wurde die Knetmasse zunächst innerhalb von einer Stunde von Raumtemperatur (ca. 25°C) kontinuierlich auf 325°C erhitzt. Anschließend wurde während 4 h

auf dieser Temperatur gehalten. Dann wurde innerhalb von 15 min auf 400°C erwärmt, bei dieser Temperatur während 1 h gehalten und dann auf Raumtemperatur abgekühlt.

- 5 Das calcinierte katalytisch aktive Material wurde zu einem feinteiligen Pulver gemahlen, von dem 50 % der Pulverpartikel ein Sieb der Maschenweite 1 bis 10 µm passierten und dessen Anteil an Partikel mit einer Längsausdehnung oberhalb von 50 µm weniger als 1 % betrug.

10

2. Schalenkatalysatorherstellung

- 28 kg ringförmiger Trägerkörper (7 mm Außendurchmesser, 3 mm Länge, 4 mm Innendurchmesser, Steatit, mit einer Oberflächen-
15 rauigkeit Rz gemäß EP-B 714700 von 45 µm und mit einem auf das Volumen der Trägerkörper bezogenen Porengesamtvolumen ≤ 1 Vol.-%, Hersteller: Caramtec DE) wurden in einem Dragierkessel (Neigungswinkel 90°; Hicoater der Fa. Lödige, DE) von 200 l Innenvolumen gefüllt. Anschließend wurde der Dragierkessel mit 16 U/min in Rotation versetzt. Über eine Düse wurden innerhalb von 25 min 2000 g einer aus 75 Gew.-% H₂O und 25 Gew.-% Glycerin bestehenden wäßrigen Lösung auf die Trägerkörper aufgesprüht. Gleichzeitig wurden im selben Zeitraum 7 kg des katalytisch aktiven Oxidpulvers aus a) über
25 eine Schüttelrinne außerhalb des Sprühkegels der Zerstäuberdüse kontinuierlich zudosiert. Während der Beschichtung wurde das zugeführte Pulver vollständig auf die Oberfläche der Trägerkörper aufgenommen, eine Agglomeration der feinteiligen oxidischen Aktivmasse wurde nicht beobachtet. Nach
30 beendeter Zugabe von Pulver und wäßriger Lösung wurde bei einer Drehgeschwindigkeit von 2 Umdrehungen/min 20 min. 110°C heiße Luft in den Dragierkessel geblasen. Anschließend wurde noch 2 h bei 250°C in ruhender Schüttung (Hordenofen) unter Luft getrocknet. Es wurden ringförmige Schalenkatalysatoren erhalten, deren Anteil an oxidischer Aktivmasse, bezogen auf die Gesamtmasse, 20 Gew.-% betrug. Die Schalendicke lag, sowohl über die Oberfläche eines Trägerkörpers als auch über die Oberfläche verschiedener Trägerkörper betrachtet, bei 230 ± 25 µm. Eine Schüttung aus den resultierenden Schalenkatalysatorringen bildete den Festbettkatalysator 2.

35

40

c) Gasphasenkatalytische Oxidation von Propen zu Acrylsäure

1. Die erste Reaktionsstufe

45

Ein erstes Reaktionsrohr (V2A Stahl; mm Außendurchmesser; 2 mm Wandstärke; 26 mm Innendurchmesser, Länge: 439 cm, sowie ein in der Reaktionsrohrmitte zentriertes Thermorohr (4 mm Außendurchmesser) zur Aufnahme eines Thermoelements mit dem die Temperatur im Reaktionsrohr ermittelt werden kann) wurde von unten nach oben auf einem Kontaktstuhl (44 cm Länge) zunächst auf einer Länge von 30 cm mit einer rauhen Oberfläche aufweisenden Steatitkugeln (4 bis 5 mm Durchmesser; Inertmaterial zum Erwärmen des Reaktionsgasausgangsgemisches 1) und anschließend auf einer Länge von 300 cm mit den in a) hergestellten Vollkatalysatorringen beschickt, bevor die Beschickung auf einer Länge von 30 cm mit den vorgenannten Steatitkugeln als Nachschüttung abgeschlossen wurde. Die verbleibenden 35 cm Kontaktrohr wurden leer belassen.

Der Teil des ersten Reaktionsrohres, der mit Feststoff beschickt war, wurde mittels 12 zylinderförmig um das Rohr aufgegossenen Aluminium-Blöcken von je 30 cm Länge, die durch elektrische Heizbänder beheizt wurden, thermostatisiert (Vergleichsversuche mit einem entsprechenden mittels eines stickstoffgeperlten Salzbadess beheizten Reaktionsrohr zeigten, daß die Aluminiumblock-Thermostatisierung eine Salzbad-Thermostatisierung zu simulieren vermag). Die ersten sechs Aluminiumblöcke in Strömungsrichtung definierten eine Reaktionszone A und die verbleibenden Aluminiumblöcke definierten eine Reaktionszone B. Die an Feststoff freien Enden des Reaktionsrohres wurden mit unter erhöhtem Druck befindlichem Wasserdampf auf 220°C gehalten.

30 2. Die zweite Reaktionsstufe

Ein zweites Reaktionsrohr (V2A Stahl; 30 mm Außendurchmesser; 2 mm Wandstärke; 26 mm Innendurchmesser, Länge: 439 cm sowie ein in der Reaktionsrohrmitte zentriertes Thermo-Rohr (4 mm Außendurchmesser) zur Aufnahme eines Thermoelements mit dem die Temperatur im Reaktionsrohr ermittelt werden kann) wurde von unten nach oben auf einem Kontaktstuhl (44 cm Länge) zunächst auf einer Länge von 30 cm mit einer rauhen Oberfläche aufweisenden Steatitkugeln (4 bis 5 mm Durchmesser; Inertmaterial zum Temperieren des Reaktionsgasausgangsgemisches 2) und anschließend auf einer Länge von 300 cm mit den in b) hergestellten Schalenkatalysatorringen beschickt, bevor die Beschickung auf einer Länge von 30 cm mit den vorgenannten Steatitkugeln als Nachschüttung abgeschlossen wurde. Die verbleibenden 35 cm Kontaktrohr wurden leer belassen.

35

Der Teil des zweiten Reaktionsrohres, der mit Feststoff beschickt war, wurde mittels 12 zylinderförmig um das Rohr aufgegossenen Aluminium-Blöcken von je 30 cm Länge thermostatisiert (Vergleichsversuche mit einem entsprechenden
5 mittels eines stickstoffgeperlten Salzbadess beheizten Reaktionsrohr zeigten, daß die Aluminiumblock-Thermostatisierung eine Salzbad-Thermostatisierung zu simulieren vermag). Die ersten sechs Aluminiumblöcke in Strömungsrichtung definierten eine Reaktionszone C und die verbleibenden sechs Aluminium-
10 blöcke definierten eine Reaktionszone D. Die an Feststoff freien Enden des Reaktionsrohres wurden mit unter Druck befindlichem Wasserdampf auf 220°C gehalten.

3. Die Gasphasenoxidation

15

Das vorstehend beschriebene erste Reaktionsrohr wurde mit einem Reaktionsgasausgangsgemisch der nachfolgenden Zusammensetzung kontinuierlich beschickt, wobei die Belastung und die Thermostatisierung des ersten Reaktionsrohres variiert wurden:
20

6 bis 6,5 Vol-% Propen,
3 bis 3,5 Vol-% H₂O,
0,3 bis 0,5 Vol-% CO,
25 0,8 bis 1,2 Vol-% CO₂,
0,025 bis 0,04 Vol-% Acrolein,
10,4 bis 10,7 Vol-% O₂ und
als Restmenge ad 100 % molekularer Stickstoff.

30 Dem Produktgasgemisch der ersten Reaktionsstufe wurde am Ausgang des ersten Reaktionsrohres eine kleine Probe für eine gaschromatographische Analyse entnommen. Im übrigen wurde das Produktgasgemisch unter Zudüsen von einer Temperatur von 25°C aufweisender Luft unmittelbar in die nachfolgende Acroleinoxidationsstufe (zu Acrylsäure) geführt (Reaktionsstufe 2).
35 Vom Produktgasgemisch der Acroleinoxidationsstufe wurde ebenfalls eine kleine Probe für eine gaschromatographische Analyse entnommen. Im übrigen wurde die Acrylsäure vom Produktgasgemisch der zweiten Reaktionsstufe in an sich bekannter Weise abgetrennt und ein Teil des verbleibenden Restgases zur Beschickung der Propenoxidationsstufe wiederverwendet (als sogenanntes Kreisgas), was den Acroleingehalt des
40 vorgenannten Beschickungsgases und die geringe Varianz der Feedzusammensetzung erklärt.

45

Der Druck am Eingang des ersten Reaktionsrohres variierte in Abhängigkeit von der gewählten Propenbelastung im Bereich von 3,0 bis 0,9 bar. Am Ende der Reaktionszonen A, C befand sich ebenfalls eine Analysenstelle. Der Druck am Eingang des zweiten Reaktionsrohres variierte in Abhängigkeit von der Acroleinbelastung im Bereich von 2 bis 0,5 bar.

Die in Abhängigkeit von den gewählten Belastungen und der gewählten Aluminium-Thermostatisierung sowie der praktizierten Luftzugabe (nach der ersten Reaktionsstufe) erzielten Ergebnisse zeigt die nachfolgende Tabelle.

T_A , T_B , T_C , T_D stehen für die Temperatur der Aluminiumblöcke in den Reaktionszonen A, B, C und D.

U_{PA} ist der Propenumsatz am Ende der Reaktionszone A.

U_{PB} ist der Propenumsatz am Ende der Reaktionszone B.

S_{WP} ist die Selektivität der Acroleinbildung sowie der Acrylsäurenebenproduktbildung zusammengenommen nach der ersten Reaktionsstufe und bezogen auf umgesetztes Propen.

U_{AC} ist der Acroleinumsatz am Ende der Reaktionszone C.

U_{AD} ist der Acroleinumsatz am Ende der Reaktionszone D.

U_{PD} ist der Propenumsatz am Ende der Reaktionszone D.

S_{AS} ist die Selektivität der Acrylsäurebildung nach der zweiten Reaktionsstufe und bezogen auf umgesetztes Propen.

RZA_{AS} ist die Raum-Zeit-Ausbeute an Acrylsäure am Ausgang des zweiten Reaktionsrohres.

V ist das molare Verhältnis von molekularem Sauerstoff:Acrolein im Reaktionsgasausgangsgemisch 2

M ist die nach der ersten Reaktionsstufe zugeführte Menge an Luft.

Tabelle

Propenbelastung [Nl Propen/l·h]	T _A [°C]	T _B [°C]	U _{PA} (%)	U _{PB} (%)	S _{WP} (%)	M (Nl/h)	V
125	316	316	78,2	94,1	97,8	490	1,40
175	328	328	79,9	94,6	96,6	685	1,42
175	320	341	72,1	95,0	97,4	680	1,37
200	325	347	73,7	94,5	98,1	775	1,38

Tabelle Forts.

37

Acroleinbelastung [Nl Acrolein/l·h]	T _C [°C]	T _D [°C]	U _{AC} (%)	U _{AD} (%)	U _{PD} (%)	S _{AS} (%)	RZA _{AS} (g/l·h)
107	262	262	92,3	99,3	94,1	95,4	162,5
148	267	267	93,2	99,3	94,6	95,2	225,3
152	254	270	76,1	99,3	95,0	95,8	232,2
173	257	273	78,3	99,4	94,5	95,8	264,0

Verfahren der katalytischen Gasphasenoxidation von Propen zu Acrylsäure

5 Zusammenfassung

Ein Verfahren der katalytischen Gasphasenoxidation von Propen zu Acrylsäure, bei dem man das Reaktionsgasausgangsgemisch mit einer erhöhten Propenbelastung in einer ersten Reaktionsstufe an einem ersten Festbettkatalysator oxidiert, der in zwei aufeinanderfolgenden Reaktionszonen A, B untergebracht ist, wobei die Reaktionszone B auf einer höheren Temperatur als die Reaktionszone A gehalten wird, und anschließend das Acrolein enthaltende Produktgasgemisch der ersten Reaktionsstufe in einer zweiten Reaktionsstufe unter einer erhöhten Acroleinbelastung an einem zweiten Festbettkatalysator oxidiert, der in zwei aufeinanderfolgenden Reaktionszonen C, D untergebracht ist, wobei die Reaktionszone D auf einer höheren Temperatur als die Reaktionszone C gehalten wird.

20

25

30

35

40

45